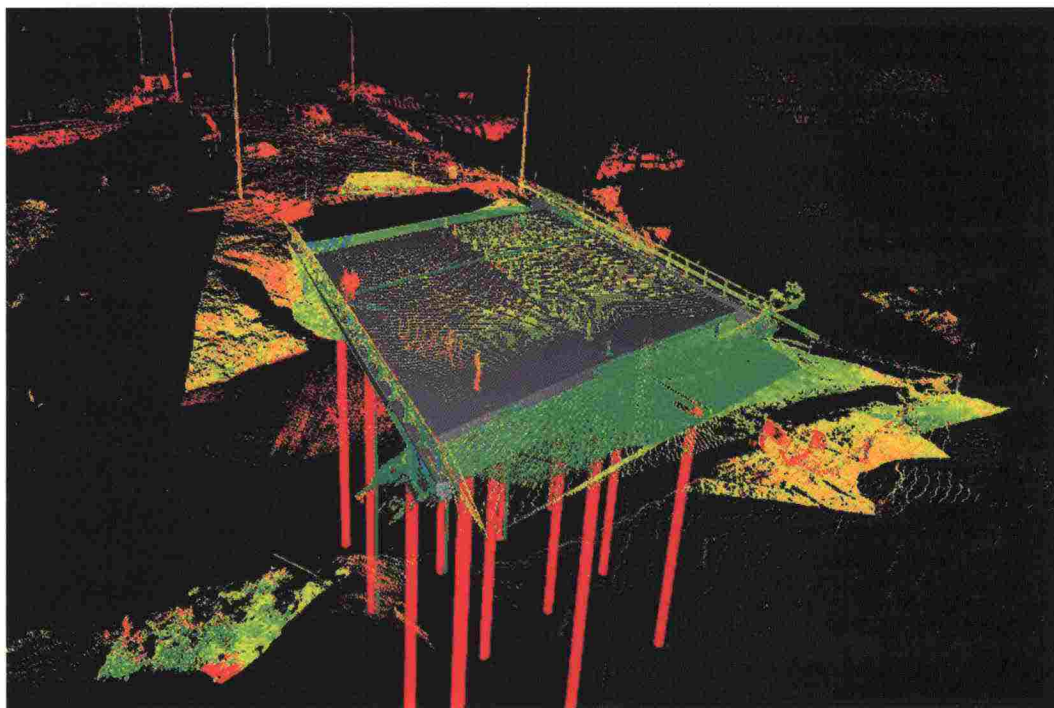


Rauno Heikkilä, Mika Jaakkola, Pekka Pulkkinen, Antti Karjalainen, Esa Haapa-aho, Mauno Jokinen

Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausjärjestelmän kehittäminen (Älykäs silta)

VÄLIRAPORTTI

Tiehallinnon selvityksiä 36/2004



Rauno Heikkilä, Mika Jaakkola, Pekka Pulkkinen, Antti Karjalainen, Esa Haapa-aho, Mauno Jokinen

Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausjärjestelmän kehittäminen (Älykäs silta)

VÄLIRAPORTTI

Tiehallinnon selvityksiä 36/2004

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-303-x
TIEH 3200886

Oy Edita Ab

Julkaisua myy/saatavana:
Oy Edita Ab
asiakaspalvelu.prima@edita.fi
puh 020 450 011
fax 020 450 2470



Tiehallinto
Siltatekninen tuki
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihde 0204 2211

TIIVISTELMÄ

Välikirje dokumentoi Älykäs silta -tutkimus- ja kehitysprojektin tuloksia. Projektin tavoitteena oli kehittää teräsbetonisiltojen 3D-suunnittelu- ja mittausjärjestelmä sekä mallintaa uuden toimintaprosessin vaiheet ja niiden keskinäinen yhdistäminen.

Tähän saakka teräsbetonisiltojen suunnittelu on Suomessa tehty 2D-piirtämiseen perustuvilla CAD-ohjelmistoilla. Tässä toimintaprosessissa sekä lähtötietojen saannissa aikaisemmista työvaiheista sillansuunnitteluun että suunnittelutietojen välityksessä edelleen työmaan mittausuunnittelu- ja mittausvaiheisiin on esiintynyt ongelmia ja tietokatkoksia. Projektissa kehitysympäristönä käytettiin pääosin MicroStation-CAD-ohjelmaa. Sillansuunnittelun lähtötiedoiksi luettiin digitaalinen maastomalli sekä tien geometriset 3D-linjat. Silta mallinnettiin 3D-tilavuusmalliksi pursottamalla määriteltäviä profiileja tien ohjauskäyriä pitkin. Valmis tarkka 3D-geometriamalli siirrettiin edelleen lähtötiedoksi sillan rakennuspiirustusten suunnitteluvaiheeseen sekä työmaan mittausuunnitteluun. Sillansuunnitteluun kokeiltiin myös AutoCADia sekä Tekla Oy:n Xengineer-rakennesuunnitteluohjelmaa. Työmaan mittauskokeissa käytettiin robottitakymetriä sekä pallo- ja sektorityyppisiä laserkeilaimia. Paikalleenmittauksissa kokeiltiin myös reaaliaikaista, CAD-työkaluilla suoraan 3D-geometriamallista valiten, pisteiden paikalleenmittausta siltapaikalle. Valmiiden siltojen tarkastusmittauksia suoritettiin robottitakymetrillä ja laserkeilaimilla. Mitattuja koordinaattipisteitä ja -pistepilviä siirrettiin takaisin CAD-ohjelmaan, jossa suoritettiin vertailuja suunniteltuun 3D-geometriamalliin. Projektissa kehitetyillä uusilla sovelluksilla voitiin suorittaa myös kokonaisvaltainen 3D-poikkeamalaskenta poikkeamien suuruuksien mukaan valitulla väriskaalalla havainnollistaen.

Teräsbetonisiltojen suunnittelussa siirtyminen 2D-piirtämisestä 3D-mallintamiseen vaikuttaa perustellulta ja hyödylliseltä. Suunnittelutyön tehokkuuden parantumisen lisäksi hyödyiksi arvioitiin myös suunnitteluvirheiden vähentyminen kolmiulotteisen mallin havainnollisuuden ansiosta. Digitaalinen maastomalli ja aikaisemmista työvaiheista saatavissa olevat muut sähköiset lähtötiedot, kuten 3D-tiegeometria sekä tulevaisuudessa esimerkiksi geotekniset tiedot, antavat sillansuunnitteluun perinteisiin menetelmiin nähden uudenlaisia mahdollisuuksia ja hyötyjä. Selvää hyötyä tulee myös geometriamallin suorasta siirtomahdollisuudesta työmaan mittauksen sähköiseksi lähtötietomalliksi.

Kehittyneillä 3D-mittaustekniikoilla sillanrakentamisen eri työvaiheiden paikalleen- ja tarkastusmittaukset voidaan suorittaa geometriamallia välittömästi hyödyntäen tehokkaasti ja tarkasti. Takymetrille suora linkitysmahdollisuus valmiiseen CAD-malliin mahdollistaa siirtymisen sujuvaan mittausuunnitteluun ilman työlästä mittausuunnitteluvaihetta. Lähtötilaisuudessa uudet älykkäät toiminnot mahdollistavat myös entistä reaaliaikaisemman mittapoikkeamien laskemisen ja toleransseihin vertaamisen. Tarkastavissa mittauksissa laserkeilaimien mittausominaisuudet ja suorituskyky vaikuttavat merkittävästi. Perinteisempiin tarkastusmittausmenetelmiin verrattuna esimerkiksi sillan laserkeilaus joka puolelta sekä eri keilausten yhdistäminen sillan 3D-pistepilveksi sujui yllättävän pienellä työmenekillä. Uudet analysointisovellukset mahdollistavat myös poikkeamatarkastelun ja toleransseihin vertailun tavalla, joka ei aikaisemmin ole ollut mahdollista.

SUMMARY

This report describes the first results of an R&D project "Intelligent Bridge" carried out 2001-2003. The aim of the project is to develop new methods for 3-D design of concrete bridges and further connect and bring the design models to the source information of site measurements. A new design concept for 3-D concrete bridge design was developed and preliminarily tested in a pilot design office. The site tests of the first implementations of real time CAD/CAM measurements using a 3-D robot tachometer, as well as a 3-D laser scanning technique, are presented and evaluated.

In bridge engineering, the information chain of the digital terrain model, 3-D road and bridge design cannot be fully utilized yet. 3-D bridge modeling should be based on terrain and road models in order to ensure faultless bridge solutions. We can evaluate that the 3-D working method will generate benefits both to bridge design and site measurements. In addition, different effects and advantages on other functions in the field of bridge engineering are estimated and can be generated.

In control measurements the effectiveness of laser scanners seems to be essential. The analyzing software of measurement results should however to be developed. In software comparison tool of measured point cloud to designed 3-D model is missing until now. Also direct tolerance comparison is not possible with the present technology of laser scanners. Deviations should be directly and easily analyzed and compared to the accuracy requirements. New CAD tools for this comparison tasks were developed in the project.

ESIPUHE

Älykäs silta -projekti käynnistettiin selvittämään mahdollisuuksia käyttää nykyaikaista tietotekniikkaa sillan suunnittelun ja rakentamisen apuna. Nykyisiä ongelmia, joita uusilla menetelmillä voitaisiin helpottaa, ovat mm. mittaustietojen syöttö käsin suunnittelun ja rakentamisen eri vaiheissa, mallien rakentaminen moneen kertaan eri toimenpiteitä varten, "älyn" katoaminen malleista suunnittelun kuluessa ja tarkemittaustietojen työläs tekeminen ja tulosten havainnollistaminen.

Väliraportti dokumentoi Älykäs silta -projektin tuloksia vaiheessa, jossa varsinaiset koko suunnittelu- ja mittausjärjestelmän kokeet ovat vasta alkamassa. Pyrkimyksenä on silti sisällöltään ja logiikaltaan mahdollisimman täydellinen tutkimusraportti, jota eri osapuolet kukin tahollaan voivat hyödyntää. Projektin ensimmäinen vaihe toteutettiin 2001-2003 ryhmähankkeena, jossa koko projektin vastuullisena johtajana toimi sillansuunnittelupäällikkö, DI Pekka Pulkkinen SuunnitteluKORTES Oy:stä. Projektipäällikkönä oli TkT Rauno Heikkilä Oulun yliopiston Rakentamisteknologian tutkimusryhmästä.

Projektin tueksi perustettiin johtoryhmä, jolle projektin etenemistä tiedotettiin jatkuvasti ja joka kokoontui projektin aikana säännöllisin väliajoin. Johtoryhmän puheenjohtajana toimi Tiehallinnon siltateknisestä tuesta Matti Piispanen, sihteerinä Rauno Heikkilä sekä muina aktiivisina jäseninä Timo Tirkkonen Tiehallinnosta, Pekka Pulkkinen ja Antti Karjalainen SuunnitteluKORTES Oy:stä, Esa Haapa-aho Terrasolid Oy:stä, Mauno Jokinen Caema Oy:stä, Aarno Oinonen Tielikelaitokselta, Harri Yli-Villamo Ratahallintokeskuksesta, Timo Rantakokko Rantakokko & Co Oy:stä ja Thomas Grönholm Tekla Oy:stä.

Helsinki, toukokuu 2004

Tiehallinto
Siltatekninen tuki

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

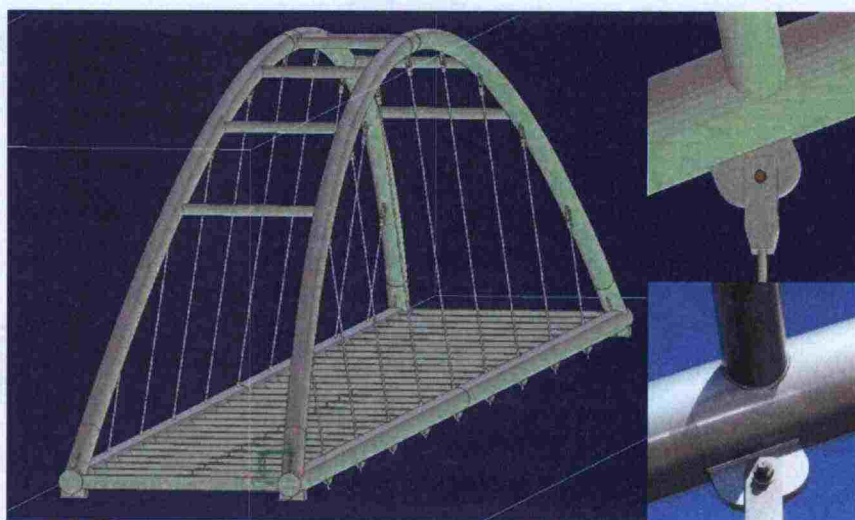
ESIPUHE

1	JOHDANTO	13
1.1	Sillanrakentamisen toimintaprosessi ja sen ongelmat	13
1.2	Uudet teknologiat ja niiden mahdollisuudet	15
1.3	Projektille asetetut tavoitteet	16
2	SILTOJEN 3D-SUUNNITTELUN JA MITTAUSTEN KEHITTÄMINEN	17
2.1	Siltojen 3D-suunnittelu- ja -mittausjärjestelmä	17
2.11	Kokonaistoimintaprosessi ja sen osat	17
2.12	Suunnittelu- ja mittausjärjestelmä ja siihen kehitetyt työkalut	18
2.13	Mittausjärjestelmä ja siihen kehitetyt työkalut	22
2.2	Suunnittelu- ja mallinnuskokeet	23
2.21	S44-pilottisillan mallinnus	23
2.22	Kuukson ratasillan mallinnus	23
2.23	Pessankosken siltakannen mallinnus	23
2.24	Xengineer-suunnitteluohjelman soveltuvuusarviointi	24
2.3	Mittauskokeiden suoritus	24
2.31	Sillan paikalleenmittaus 3D-siltamallin avulla	24
2.32	Pessankosken sillan Callidus-laserkeilaus	26
2.33	S44-pilottisillan Callidus-laserkeilaus	28
2.34	S44-pilottisillan Cyrax-laserkeilaus	29
2.35	Terässiltalohkon Cyrax-laserkeilaus	32
2.4	Muut työmaahavainnoinnit	34
2.41	Hausjärven ratasillan lyöntipaalaus	34
2.42	Kuukson ratasillan tunkkaus	34
3	TULOKSET	35
3.1	Suunnittelu- ja mallinnuskokeiden tulokset	35
3.11	S44-pilottisillan mallinnus	35
3.12	Kuukson ratasillan mallinnus	36
3.13	Pessankosken siltakannen mallinnus	36
3.14	Xengineer-suunnitteluohjelman soveltuvuusarviointi	37
3.2	Pessankosken sillan laserkeilaustulokset	39
3.3	S44-pilottisillan Callidus-laserkeilaustulokset	40
3.4	S44-pilottisillan Cyrax-laserkeilaustulokset	40
3.5	Terässiltalohkon laserkeilaustulokset	47
3.6	Havainnot ratasiltatyömailta	51
3.61	Hausjärven ratasillan lyöntipaalaus	51
3.62	Kuukson ratasillan tunkkaus	54
4	PÄÄTELMÄ	59
	LÄHDELUETTELO	60

1 JOHDANTO

1.1 Sillanrakentamisen toimintaprosessi ja sen ongelmat

Sillanrakentamisprosessi koostuu suunnittelutyövaiheista, erityyppistä mittauksista, käytännön rakentamistöistä sekä laadunvalvontatehtävistä. Sillan päällysrakenne liittyy osaksi tien geometriaa. Sillan alusrakenteet ovat yleisimmin kantavia teräs- tai betonirakenteita. Sillan päällysrakenteen suunnittelu, rakentaminen ja niihin liittyvät mittaukset tehdään tiegeometriaympäristössä. Alusrakenteiden suunnittelu- ja valmistusprosessit liittyvät enemmän teräs- tai betonirakentamisen valmistusprosesseihin. Teräsbetonisiltojen eri osarakenteiden suunnittelu suoritetaan edelleen yleisesti 2D-AutoCAD-ohjelmistolla. Työmailla käytetään kuitenkin jo yleisesti kehittyneitä 3D-mittaustekniikoita kuten takymetrejä. Tarvittavat mittausten ohjaus- ja vertailutiedot joudutaan suunnittelemaan erillisenä työvaiheena manuaalittyyppisin metodein. Betonisilloista poiketen terässiltojen suunnittelussa käyttöön on jo otettu 3D-suunnittelutyökaluja (esimerkkinä Tekla Oy:n Xsteel-ohjelmisto), joilla tuotettuja geometriatietoja hyödynnetään jo suoraan konepajoilla teräsosien valmistuksessa.



Kuva 1. Esimerkkinä Xsteel-ohjelmalla suunniteltu terässillan 3D-geometriamalli. Mallista voidaan suoraan tuottaa konepajan tarvitsemat työstötiedostot (numeeriset koneenohjausmallit).

Perinteisesti suunnittelun tulosteena saadaan CAD-kuvia, joita ei voida suoraan hyödyntää rakentamisen mittauksissa vaan väliin tarvitaan erilaisia formaatinmuunnoksia ja koodausta suunnitelmatietojen muuntamiseksi työmaan mittalaitteille ja työmenetelmille soveltuvaan muotoon. Suunnitelmatietoa voitaisiin hyödyntää paremmin prosessissa jos rakenteet suunniteltaisiin työmaan 3D-koordinaatistoon geometrisinä elementteinä, jotka mittojen lisäksi sisältävät älyä ja tietoa rakenteen toteuttamiseksi. Toisaalta siltarakenteiden laadunvalvontamittauksia tehdään ja tallennetaan yhden rakennushankkeen aikana suuret määrät, mutta tulokset toimitetaan tilaajalle usein pelkästään koordinaattiluettelona ilman visualisointia. Laadunvalvonnan tulokset tulisi esittää ymmärrettävässä muodossa. Mahdolliset virheet tulisi löytää nopeasti ja ne olisi edelleen voitava helposti raportoida. Jos laadunvalvontamittausten tulosteita ei esitetä ymmärrettävässä muodossa ei myöskään poikkeamiin voida reagoida eikä laadunvalvonta vastaa tarkoitustaan. Kansainvälisissä siltahankkeissa prosessin puutteiden merkitys

korostuu entisestään. NykYTEknologialla olisi kuitenkin periaatteessa mahdollista jo hyödyntää sillan 3D-rakennesuunnitelmaa suoraan myös poikkeamien visualisoinnissa.

Suurten vesistösiltojen siltalohkojen asennusvaiheessa paikalleenmittausten onnistunut suoritus on vaativa ja olennaisen tärkeä työvaihe koko työmaan etenemiselle. Dimensiot ovat tyypillisesti todella suuria ja mittatarkkuusvaatimukset samalla erittäin kovia. Geometrianhallinta on siltatyömailla vaikeaa. Terästen paksuusvaihtelut ja sekä erilaiset lujuusominaisuuksien vaihtelut aiheuttavat geometrisia muutoksia, joita joudutaan sekä ennakoimaan että jälkikäteen korjaamaan. Muottien suunniteltuja dimensioita joudutaan muuttamaan valunaikaisten muodonmuutosten ja taipumien huomioonottamiseksi.



Kuva 2. Kolmiulotteinen mittatarkkuuden hallinta on edellytys jättsillan suurlohkojen asennuksen onnistumiselle. Kuvassa Raippaluodon sillan 3D-geometriaa ulokeasennusvaiheessa.

Wistbacka (2003) on raportoinut vinoköysisillan ulokeasentamisen geometrianhallinnan ongelmista. Useimmiten suuret vinoköysisillat rakennetaan ulokeasennusmenetelmällä. Tällöin geometrian kontrollointi on yhdessä rakenneanalyysin kanssa oleellisesti monimutkaisempaa kuin aputukia käytettäessä. Asennuksen tavoitteena on mahdollisimman tasainen pysyvien kuormien jakauma ja sillan jouheva geometria. Rasitusten tulee olla sallituissa rajoissa myös kaikkien asennustyön eri työvaiheiden aikana. Asennettavien lohkojen on kohdattava toisensa riittävän pienellä pysty- ja vaakasuuntaisella poikkeamalla. Jokaisessa työvaiheessa mitattuja poikkeamia verrataan laskennalliseen rakennemalliin. Toleranssien ylitystapauksissa asennus on keskeytettävä, kunnes poikkeamien syyt on saatu selvitettyä. Jokaisessa asennusvaiheessa tarvitaan yleensä oma rakennemallinsa. Esimerkiksi Kärkistensalmen vinoköysisillassa (pituus 787,5 m, pääjänne 240 m, suuremman pylonin korkeus 96 m, köysipareja 30 kpl) käytettyjä rakennemalleja oli yhteensä 165 kpl.

Myös muita numeerisia koneohjausmahdollisuuksia voidaan siltatyömaalta havaita. Esimerkiksi paalutuskoneiden ohjauksessa 3D-mittaustehtäviä esiintyy runsaasti. Paaluja lyödään paksuudeltaan vaihtelevan sorapetien päältä usein vinoon, jolloin sorapetien paksuusvaihtelut aiheuttavat yhdessä paalujen liukumisen kanssa ennakkointitarpeita. Sillanrakennusalalla laatuvaatimuksia määrittelee Sillanrakennuksen Yleiset Laatuvaatimukset (SYL) ja siltakohtaiset laatuvaatimukset, jotka suunnittelija esittää eteenpäin käyttäen työkaluna SILAVA-ohjelmistoa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että silta-alan kokonaistoimintaprosessissa on selkeitä kehittämis- ja tehostamismahdollisuuksia. Prosessin eri vaiheiden toimijoilla on kullakin käytössään omia yksilöllisesti suunniteltuja ja toteutettuja työmenetelmiä ja työkaluja, jotka kokonaisprosessin näkökulmasta toimivat puutteellisesti, osittain jopa virheellisesti, katkoen, estäen ja hidastaen tietojen kulkua sekä suoran, tehokkaan ja virheettömän jalostusketjun toimivuutta.

1.2 Uudet teknologiat ja niiden mahdollisuudet

Kolmiulotteiseen rakennustyömaiden mittaustehtäviin soveltuvat mittausmenetelmät ja -tekniikat ovat aivan viime vuosina kehittyneet oleellisesti. Uudet takymetrit kykenevät mittaamaan prisman lisäksi myös kohteisiin asennettuihin heijastintarroihin sekä tietyin edellytyksin jopa kohteen omaan luonnollisiin pintoihin. Joissakin takymetreissä on ominaisuutena myös osoitinlaser, jonka avulla koordinaattipisteitä voidaan myös mitata paikalleen kohteiden pintoihin. Vuonna 2001 Terrasolid Oy toi Suomeen ensimmäisenä työmaiden 3D-laserskannauksiin soveltuvan Callidus-laserkeilaimen. Terrasolid Oy on kehittänyt tekniikkaan yhteensopivan TerraScan- ja TerraPohoto -datankäsittelyjärjestelmät MicroStation-CAD-ympäristöön. Sveitsiläisellä mittalaiteryrityksellä Leicalla on myös vastaava Cyrax-laserkeilaustekniikka, jota on kokeiltu siltojen suunnittelu- ja rakentamisvaiheissa menestyksellä Pennsylvaniassa Yhdysvalloissa (Professional Surveyor, May 2000). Leica on myös parhaillaan tuomassa markkinoille kokonaan uuden laserkeilainsarjan.

Maassamme Oulussa sijaitsee merkittävä sillansuunnittelukeskittymä, jolla on merkittäviä referenssejä myös suursiltojen suunnittelun viennissä. Suunnittelutoimistot ovat Suomessa perustaneet myös kaksi vientiyhtiötä, MESTRA Ltd:n ja FINNROAD Ltd:n, joilla tulee lähitulevaisuudessa olemaan roolia myös uusien tekniikoiden käyttöönotossa ja hyödyntämisessä. Viennin kehittämisessä uusien kehittyneempien 3D-suunnittelu- ja toimintamenetelmien kehittämisen merkitys arvioidaan erittäin oleelliseksi. Pelkästään siltojen kokonaisvaltaiseen 3D-geometrianhallintaan soveltuvalle tuotteelle ja palvelulle voidaan suurissa ja monikansallisissa siltahankkeissa arvioida kohdistuvan merkittävä tarve ja kysyntä sekä sitä kautta potentiaalinen uusien tuotteiden ja palveluiden vientimahdollisuus Suomesta.

Maarakennusalan automatisointi on maailmanlaajuisesti etenemässä ja sen volyymi kasvaa lähivuosina merkittävästi. Oulun yliopiston ja VTT Automaation johdolla kehitetyt automaattiset teränohjausjärjestelmät tarjoavat erinomaisen pohjan uuden sukupolven maarakennuskoneautomaation kehittämiseksi. Reaaliaikaiset CAD/CAM-mittaussovellukset ja -menetelmät yhdistettynä mahdollisiin tietokantapohjaisiin havaintotietojen tallennus- ja hyödyntämismenettelyihin tarjoavat kokonaan uudentyyppisiä toteutusmahdollisuuksia teiden, katujen ja siltojen suunnittelu-, rakentamis- ja ylläpitoprosesseihin.

1.3 PROJEKTILLE ASETETUT TAVOITTEET

Projektin tavoitteena on kehittää koko sillanrakennusprosessin läpi toimiva digitaalinen, reaaliaikainen ja graafinen 3D-toimintajärjestelmä. Tavoitteena on kehittää sillanrakentamisprosessia uusia suunnittelu- ja mittausteknologioita hyödyntäen. Käytännön tavoitteina on määritellä siltojen geometriatietojen kulku tie- ja geosuunnittelijoiden lähtötiedoista sillansuunnittelun kautta työmaalle. Pyrkimyksenä on luoda avoin 3D-rakennemalli sillasta ympäristöineen, jota jatkossa kukin osapuoli pystyy omilla ohjelmistoillaan käsittelemään ja hyödyntämään. Käytännön tavoitteena on kehittää 3D-CAD-ohjelmiston työkalut sillansuunnitteluun, mittaussuunnitteluun, ja ottaa käyttöön suoraan suunnitelmätietoa hyödyntävät mittausmenetelmät siltatyömaan rakennustyötä ohjaavissa ja laatua tarkastavissa mittauksissa.

Tavoitteena oli, että uuden järjestelmän tiedonsiirron rajapinnat ovat avoimia ja tulokset saadaan koko alan käyttöön. Tavoitteena oli myös kehittää ja julkistaa koko alan hyödynnettäväksi sillan suunnittelu-, mittaus- ja laadunvalvontaproessin 3D-toimintamalli. Lisäksi tavoitteena oli tuottaa uutta tietoa siltatyömaan automaattisten koneohjausmenetelmien kehittämis- ja hyödyntämismahdollisuuksista.

Yritysten tuotekehitys- ja liiketoimintatavoitteina oli kehittää, parantaa ja lisätä siltojen suunnittelun ja rakentamisen tehokkuutta, laatua, kilpailukykyä ja vientiä:

- *tehokkuutta* kehittämällä ja luomalla kaikkien toimijoiden yhteistyönä uusi koko jalostusprosessin kattava toimintajärjestelmä, jonka eri sovellusosia kukin toimija tehtävänsä mukaisessa vaiheessa käyttää ja hyödyntää oman työnsä sujuvuuden ja tehokkuuden kasvattamiseksi
- *laatua* kokoamalla, yhdistämällä ja järjestämällä uudelleen nykyisen hajanaisen siltaproessin osat kokonaisvaltaiseksi ”älykkääksi” geometrianhallintajärjestelmäksi, automatisoimalla kokonaisprosessin virhealttiita työvaiheita sekä kehittämällä reaaliaikaiseen laadun toteamiseen soveltuvat graafiset CAD/CAM/CAC-työkalut
- *kilpailukykyä* kehittämällä silta-alan yritysten ja muiden toimijoiden työssään tarvitsemat kehittyneemmät työkalut (tuotteet) 3D-geometriatietojen hallintaan pienentäen siten työkustannuksia ja nostaen työn tuottavuutta sekä
- *vientiä* avaamalla kokonaan uusien tuotteiden ja palveluiden vientimahdollisuudet joko erillisinä tuotesovelluksina (Terrasolid Oy) ja/tai yhteistyötyyppisesti osana laajempaa palvelutuotetta vientisiltaurakoissa (suunnittelutoimistot, mittausyritykset ja urakoitsijat).

Projektin tavoitteena oli yritysten osalta kehittää myös uusia tuotteita:

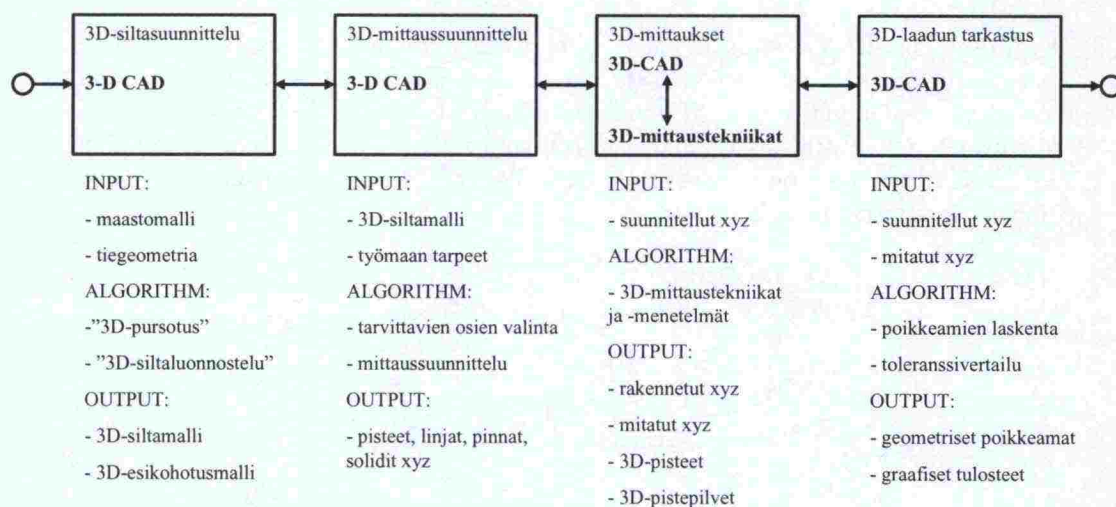
- 3D-rakennemallin luonti nykyisistä suunnittelujärjestelmistä sekä 3D-perussillansuunnittelutyökalujen kehittäminen MicroStation-CAD-ohjelmistoon
- siltojen 3D-mittaussuunnittelusovellusten kehittäminen MicroStation-CAD-ohjelmistoon
- siltojen 3D-ohjaavien ja tarkastavien mittausmenetelmien ja -sovellusten kehittäminen siltatyömaalle sekä
- siltojen 3D-laadunvalvontasovellusten (toleransseihin vertaamiseksi) kehittäminen MicroStation-CAD-ohjelmistoon.

2 SILTOJEN 3D-SUUNNITTELUN JA MITTAUSTEN KEHITTÄMINEN

2.1 Siltojen 3D-suunnittelu- ja -mittausjärjestelmä

2.11 Kokonaistoimintaprosessi ja sen osat

Siltojen 3D-suunnittelu- ja -mittausjärjestelmä sisältää neljä päävaihetta: sillansuunnittelu, mittaussuunnittelu, mittaukset sekä laaduntarkastus (kuva 3). Kaikki työvaiheet tehdään 3D-geometriaa käyttäen. Suunnittelua alkaa lähtötietojen hankinnalla, jossa tavoitteena on riittävät tiedot sillan mallintamista varten. Sillansuunnittelun peruslähtötiedoiksi tarvitaan siltapaikkaa koskeva digitaalinen maastomalli, kolmiulotteinen tiegeometriatieto sekä geotekniset tiedot. Oleellista on, että maastomalli tulisi olla sillansuunnitteluvaiheessa päivitetty viimeisimmän tiesuunnitelman mukaiseksi. Tarvittavaan tiegeometriatietoon sisältyy tiedot mm. mittalinjoista, taitelinjoista, luiskista, hyödyllisen leveyden reunalinjoista sekä tierakenteiden alapinnoista. Siltapaikan geoteknisiin tietoihin sisältyvät tiedot mm. kairaustuloksista, kallionpinnasta, maakerroksista, paalujen arvioidusta tunkeutumistasosta. Näiden lisäksi tarvitaan tiedot siltapaikan olemassa olevista muista rakenteista kuten putkista ja kaapeleista.



Kuva 3. Siltojen 3D-suunnittelu- ja -mittausprosessi.

3D-sillansuunnittelussa tavoitteena on luoda uuden sillan kolmiulotteinen tarkka malli. 3D-mallin avulla voidaan edelleen luoda pohjat rakennepiirustuksille, kuvannot mittapiirustuksiin, poikkileikkaukset, tasopiirustukset, tarvittavat detaljit jne. Edelleen mallia voidaan hyödyntää mm. raudituspiirustuksia varten sekä suunnitelman visualisointiin. Mallin tiedot voidaan myös siirtää muihin yleisimmin käytettäviin CAD-järjestelmiin, lujuuslaskentaohjelmistoihin. Projektissa oleellista on mallin siirto 3D-mittaussuunnittelutyövaiheeseen, jossa tavoitteena on poimia ja siirtää työmaan mittauksiin eri työvaiheissa tarvittavat mittatiedot. Mittauksia tarvitaan rakennustyötä ohjaamaan (ns. tuotantoa ohjaavat mittaukset l. paikalleenmittaukset) sekä valmiiden rakennusosien laadun tarkastamiseen (tuotantoa tarkastavat mittaukset l. laatumittaukset). 3D-mittaukset voidaan tehdä yksittäisiä koordinaattipisteitä mittaavilla takymetreillä tai 3D-pistepilviä mittaavilla laserkeilaimilla. Laaduntarkastamisen oleellinen vaihe on mittaustulosten vertailu suunnitelmamalliin eli mittapoikkeamien laskenta. Toleranssit kuvaavat suurimmat

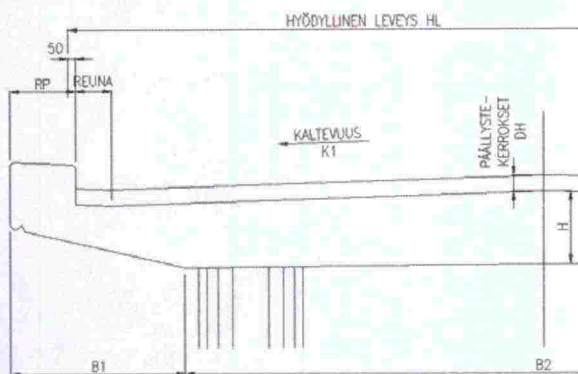
sallitut mittapoikkeamat. Grafiikan avulla poikkeamaylityksiä voidaan tarkastella havainnollisesti.

2.12 Suunnittelujärjestelmä ja siihen kehitetyt työkalut

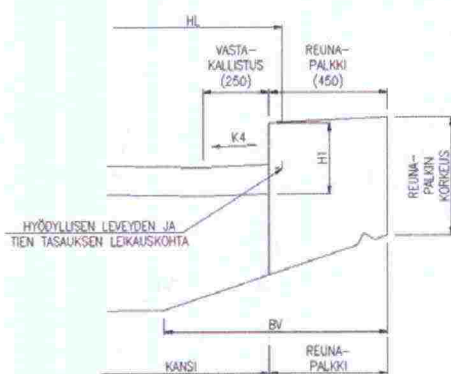
Sillan 3D-geometriamalli on suunniteltu tehtävän mahdollisimman paljon tie- ja maastogeometriaa hyödyntäen. Mallintamisessa voidaan käyttää kehittyneistä CAD ohjelmista tuttuja parametrisia profiileita ja tyyppikappaleita (poikkileikkauksen muodot, päätypalkit, siipimuurit, reunapalkit) ja tyyppielementtejä (pintavesiputket, tippuputket, siirtymälaatat, kaiteet). Mallintamalla myös tarvittavat maarakennustyöt (esimerkiksi kaivannot ja täytöt) voitaisiin saavuttaa hyötyä ainakin sillan päämittojen tarkastelussa ja määrälaskennassa. Mallintamisen tavoitteena on tarkka sillan geometrian 3D-malli, josta on mahdollista siirtää geometriatietoa mittausjärjestelmiin ja rakennelaskentaan.

3Dmallinnustyökaluja tarvitaan sillan poikkileikkauksen ja reunapalkin muodon määrittämiseen, kansirakenteen pursotustyyppiseen mallintamiseen väylägeometrian avulla, tukilinjojen määrittämiseen, luiskien mallintamiseen, päätyjen ja siipimuurien sovittamiseen luiskiin ja erilaisten aukkovaatimusten tarkasteluun. Perustukset voidaan määrittää perustustason mukaan. Paalujen mallinnus tehdään määritettyyn tasoon (arvioitu tunkeutumistaso, kalliopinta). Kaivantojen mallinnus muodostaa myös oman sovellusalueensa.

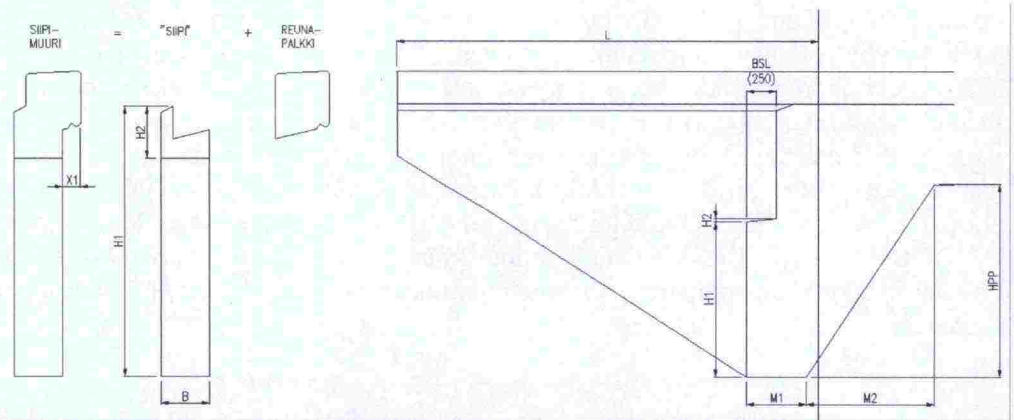
Tyypillisistä siltojen mittamaailmaan liittyvää mallinnusproblematiikkaa, kuten aukkovaatimukset, luiskakaltevuudet, jännemitat ja siipimuurien pituudet, on mahdollista automatisoida. Yksinkertaisimmillaan sillan 3D-mallinnus on tilavuusmallin luomista poikkileikkausta pursottamalla tiegeometriakäyrän avulla. Seuraavissa kuvissa on esimerkkejä tyypillisistä siltojen 3D-kappaleista ja parametrisoitavista mitoista.



Kuva 4. Sillan päällysrakenteen poikkileikkaus



Kuva 5. Reunapalkki



Kuva 6. Sillan siipimuuri ja päätypalkki

Kehittyneen 3D-suunnittelun tuloksena syntyvästä mallista voitaneen käyttää tuotemalli-nimeä. Tuotemalli sisältää geometria- ja määrätiedon lisäksi materiaalitietoa. Sillan tuotemalliin voidaan myös yhdistää monipuolisesti erilaista rakentamista ohjaavaa tietoa:

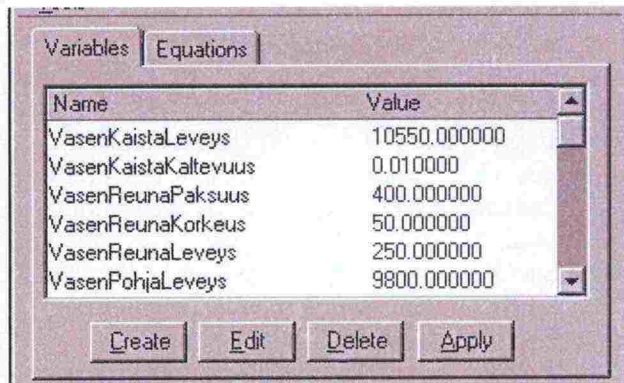
- laatuvaatimus- ja toleranssijärjestelmää vastaavat attribuutit (Littera, vaatimuksen
- nro, tyyppi) kytkettynä 3D-kappaleisiin
- rakenneosan tunnus (päällysrakenne, maatuki, välituki)
- betonin lujuus, pakkasenkestävyys
- teräsosien laatu, pintakäsittely
- muotitettavat pinnat
- vesieristettävät pinnat, vesieristysrakenne
- pintarakenteet, päällysteet
- rakenteen muodonmuutoksesta johtuva esikohotusmuoto

Sovellustyökaluilla voidaan edelleen kehittää geometriamalliin kytketyn lisätiedon hallintaa ja tiedonsiirtoa sillanrakennustyön eri osapuolille. Urakoitsijalle voitaisiin tuottaa esim. taulukkolaskentaan siirrettävää luettelotietoa kustannuslaskennan ja työnsuunnittelun pohjaksi. Perinteisiin mittausmenetelmiin tarvittavia mittapisteluetteloita voidaan tuottaa geometriamallin avulla halutuista pisteistä. 3D-geometriamalli mahdollistaa myös jatkosuunnittelun monella tavalla. Luontevinta olisi tehdä rakennesuunnittelu mahdollisimman paljon samaan geometriamalliin. Uusimmissa CAD-ohjelmistoissa alkaa jo olla riittävästi ominaisuuksia tähän. Kuitenkaan betoniranteisen sillan suunnittelua raudoituksineen ei liene Suomessa kokeiltu täysin 3D-mallintamiseen perustuen.

Myös tiedonsiirto muihin CAD-järjestelmiin ja laskentaohjelmiin on mahdollista. Rakennesuunnittelua voidaan näin tarvittaessa jatkaa suunnittelijoiden yleisimmin käyttämillä CAD-järjestelmillä. 3D-geometriamalli toimii luonnollisesti laadittavien mitta- ja detalji- ja raudotepiirustusten pohjana. Yleistävä siltasuunnitelmien visualisointi onnistuu nopeammin valmiin geometriamallin avulla. Geometritiedon siirtomahdollisuus yhä yleisemmin käytettäviin FEM-laskentaohjelmiin etenkin betonirakenteiden laattasiltojen suunnittelussa toisi myös lisää etua.

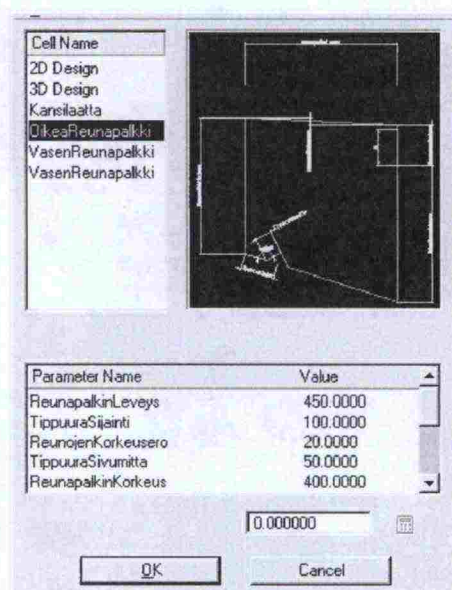
Teräsbetonisillan 3D-suunnittelua voidaan tehdä hyödyntäen MicroStationin yleisiä ominaisuuksia sekä projektissa kehitettyjä uusia sovellustyökaluja. Valmiina on kansilaatan ja reunapalkin vakiopoikkileikkauksen pursotustyökalu (BRIDGE DECK) parametrien alustusohjelmineen. Vielä keskeneräisiä ovat muuttuvan profiilin (tienpinnan kaltevuus muuttuu sillan matkalla) ja jo lähes valmiit lineaarisen pursotuksen (tarvitaan siipimuureissa ja päätypalkeissa) työkalut. Käyttöliittymää on myös tarkoitus parantaa. Esikohotusominaisuuksien toteutus jää

vuodelle 2004. Ominaisuus on suunniteltu toteuttavaksi mallintamalla esikohotettu pinta solidin pintoja lähtötietoina käyttäen. Valmiiksi saatu ohjelma toimii siltatyypeillä, joiden leikkausprofiili pysyy koko kannsirakenteen matkalla samana. Ominaisuus vastaa pitkälti MicroStation Tube Feature -komentoa, mutta siihen on lisätty automaattinen parametrien parsiminen pursotusprofiilin ja yleisten parametrien välille. Lisäksi on lisätty komento, jolla yleisiin parametreihin voidaan alustaa alkuarvot siltasuunnitteluparametreille. Parametrit alustetaan komennolla BRIDGE PARAMETERS CREATE, jolloin MicroStationin Global variables-listaan lisätään joukko alkuparametreja. Parametreja tullaan vielä myöhemmässä vaiheessa lisäämään.

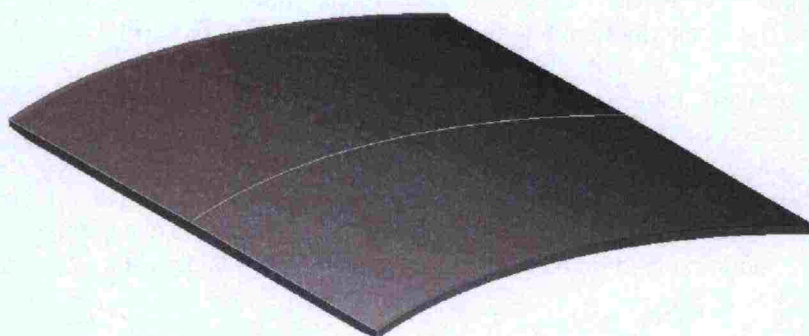


Kuva 7. 3D-pursotusta varten tarvittava parametrien alustusvalikko.

Sillan mallintaminen alkaa lähtötietoina tarvittavasta tieprofiilista. Tärkein geometrinen tieto on tien keskilinjaa ohjauskäyrä. Sillan kansi pursotetaan keskilinjaa myöten BRIDGE DECK -komennolla käyttäen kansilaatalle valittua parametrista profiilia. Profiilivalikoimaan voidaan myöhemmin lisätä suunnittelijoiden tarvitsemia muita profiileja. Profiilin valinnan jälkeen voidaan osoittaa haluttua tielinjaa, jota pitkin pursotus suoritetaan. Mallinnuksen lähtökohtana on, että johtokäyrät saadaan lähtötietoina tiesuunnitelmasta (esimerkiksi Terra Street). BRIDGE DECK -komento liittää automaattisesti profiilin parametrit vastaaviin suunnitteluparametreihin. Pursotus toimii koko johtokäyrän matkalle, joten johtokäyrä tulee olla katkaistu halutusta kannen lähtöpisteestä ja loppupisteestä. Vaihtoehtoisesti pursotetun kannen päät leikataan pursotuksen jälkeen suunnittelijan osoittamista kohdista, jolloin kannesta tulee halutun pituinen. Seuraavaksi irroitetaan siltaprofiilista reunakäyrät ohjauskäyriksi reunapalkkeja varten. Reunapalkit pursotetaan käyriä pitkin komennolla BRIDGE DECK. Tukimuuri mallinnetaan käyttäen lineaarista pursotusta. Tukimuuri pursotetaan reunapalkkien ulkopuolelle ja leikataan oikean mittaiseksi. Siipimuuri pursotetaan vastaavasti. Pilarit voidaan tehdä MicroStationin standardityökaluilla joko CYLINDER FEATURE -komennolla tai pursottamalla jotain profiilia. Tämän jälkeen sillan kansirakennetta voidaan muokata muuttamalla MicroStationin Global variables -listan parametreja.

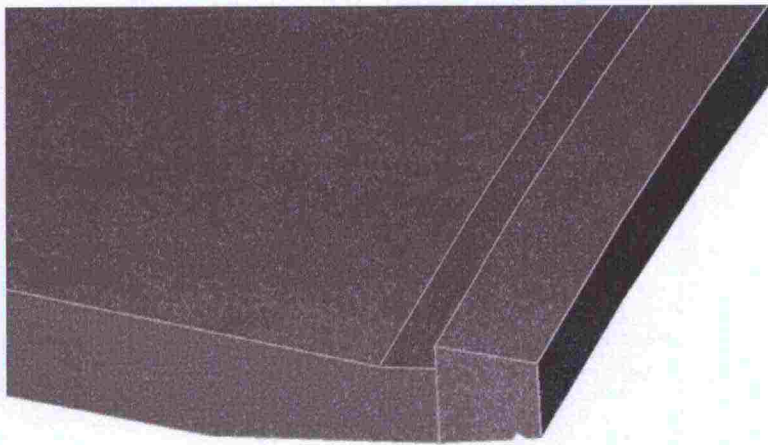


Kuva 8. BRIDGE DECK –komennolla avautuva profilien valintaikkuna.



Kuva 9. Johtokäyrää pitkin pursotettu kansilaatta.

Ensimmäisessä vaiheessa on keskitytty ratkaisemaan siltarakenteen kansiosan mallintamisen ongelmia. Tavoiteena oli ratkaisu, jolla kyetään mallintamaan suurin osa betonisiltojen kansirakenteista. Samalla pyrittiin käyttämään mahdollisimman paljon hyödyksi jo olemassa olevia MicroStation ominaisuuksia, kuten mittaohjattuja profiileja. Ajatuksena oli, että tarvittavia leikkausprofiileja kyetään myöhemmin lisäämään suunnittelujärjestelmään asiakkaan toimesta. Suuri osa sillan muista rakenteista voidaan mallintaa olemassa olevilla solid-mallinnustyökaluilla riittävän tehokkaasti, kunhan tarvittavat profiilit ovat saatavilla. Esikohotuksen esittäminen on kansirakenteen mallintamisen jälkeen seuraava, johon tarvitaan lisää työkaluja.



Kuva 10. Johtokäyriä pitkin pursotettureunapalkki.

Kansilaatan esikohotuksen esittämiseksi voidaan nykyisellään käyttää MicroStationin DEFORM FACE -komentoa. Vastaava ominaisuus siten, että sille kykenisi antamaan pistematriisin olisi tarpeellinen ominaisuus esikohotuksia laadittaessa. Samoin mallin esittäminen esikohotettuna ja ilman esikohotusta pitää olla helppoa. SUPRESS FEATURE -toimintoa voidaan käyttää, mutta vielä on pohdittava onko sen käyttäminen normaalissa suunnittelutyössä riittävän helppoa.

Tippuputket ja muut pienet yksityiskohdat voidaan mallintaa pääasiassa kirjastokomponentteja käyttämällä. Ohjelmistoon voisi jatkossa listata kirjastot yleisimmistä yksityiskohdista. Samalla tulisi harkita, tarvitaanko yksityiskohtien sijoittamiseen lisätyökaluja vai pärjätäänkö jo olemassa olevilla. Tulisi myös tutkia, tarvitaanko kyseisten ominaisuuksien kohdalla lisää riippuvuuksia olemassa olevaan malliin: esimerkiksi onko paikka riippuvainen jostain reunakäyrästä.

2.13 Mittausjärjestelmä ja siihen kehitetyt työkalut

Siltojen mittauksiin liittyvät työvaiheet voidaan karkeasti jakaa suunnittelijalta saadun aineiston läpikäyntiin, paikalleenmittauksiin, laatumittauksiin sekä analyysiin ja raportointiin.

Suunnittelijalta saadun aineiston läpikäyntiin sisältyy lähtöpisteiden lisäys suunnitelmaan, aineiston läpikäynti ja ”tutustuminen” siltaan, siltakohtainen mittaussuunnitelma maastossa tapahtuvaa mittausta varten, käytettävät mittalaitteet ja tietojen vienti eri mittausjärjestelmiin. Mittaus maastossa alkaa orientoitumisella ja orientoititietojen tallennuksella. Mittausta varten suunnittelijan tekemää aineistoa käytetään joko kokonaisuutena tai siitä on erikseen poimittu yksittäisiä pisteitä, linjoja tai pintoja kuten pilareiden keskipisteet, reunapalkin ulkoreuna yläpinnasta tai kannen yläpinta. Mittaajan on pystyttävä maastossa muokkaamaan aineistoa esimerkiksi tarvittavien telinekohotusten huomioon ottamiseksi. Käytettävän mittalaitteen on oltava ergonomialtaan maastomittauksiin soveltuva. Mittausohjelman oltava selkeä.

Laatumittaus- ja raportointityövaiheeseen sisältyy mitattavien kohteiden listaus, selkeät raportit kuten esimerkiksi havainnekuvat, mittauksen tulokset, mittauksien sisältämien virheiden arviointi, mitattujen kohteiden välitön poikkeamavertailu (viite SYL), mahdollisuus suorittaa maastossa erilaisia laskentoja kuten kahden suoran leikkaus tai ympyrän keskipiste sekä jälkilaskenta mitatuista kohteista.

2.2 Suunnittelu- ja mallinnuskokeet

2.2.1 S44-pilottisillan suunnittelu ja mallinnus

S44-pilottisillan suunnittelun lähtötiedoiksi saatiin maastomalli sähköisenä versiona (DXF-formaatti kolmioverkkona) sekä tiegeometriatiedot poikkileikkauksina 20 m paaluvälein. Tiedot saatiin myös sähköisessä muodossa (DXF-formaatti). Lähtötietojen avulla mallinnettiin aluksi tien tasausviiva. Piirretty kannen poikkileikkaus pursotettiin päällysrakennekerrosten verran alemmas kopioitua tasausviivan suuntaista ohjauskäyrää pitkin. Tien poikkileikkausten avulla mallinnettiin myös tien poikkileikkaukset ja myös tieluiskat. Mallia hyödynnettiin sillan suunnitelmapiirustusten tuottamisessa. AutoCADIin siirrettiin mallista suoraan geometriatietoja kuten tasoja ja leikkauksia.

2.2.2 Kuukson ratasillan mallinnus

Kuukson alikulkusillan 3D-mallinnukseen saatiin lähtötiedoiksi suunnitelmakansio, johon sisältyivät sillan suunnitelmapiirustukset, siltapaikka-asiakirjat (ratageometria, geoteknisiä tiedot). Sillan rakenne mallinnettiin rakennussuunnitelman mukaiseksi. Aluksi CADIin mallinnettiin suunnitelman mukainen 3D-ratalinja (kahden radan välinen keskilinja). Alikulkuun sisältyi kaksi erillistä siltalohkoa. Kummallekin siltalohkolle luotiin ohjauskäyrä ratageometrian avulla. Seuraavaksi luotiin sillan rakennussuunnitelman mukaiset poikkileikkaukset. Poikkileikkauksien avulla pursotettiin tämän jälkeen lohkojen tilavuusmallit. Malli viimeisteltiin päätypalkkien ja siipimuurien mallintamiselta. Lisäksi mallinnettiin paalujen tukilinjat ja tilavuusmalleina paalut. Mallinnuksessa käytettiin MicroStation 8-version 3D-mallintamisen perustyökaluja. Mallit tarkistettiin vertaamalla suunnitelmassa esitettyjä xyz-mittoja CAD-malleihin. Paalujen sijainnit tarkistettiin vertaamalla paalujen koordinaatteja suunnitelmissa esitettyihin koordinaatteihin. Malli tehtiin suunnitelman mukaiseen KKJ-koordinaattijärjestelmään.

2.2.3 Pessankosken ratasillan mallinnus

Pessankosken ratasilta oli 5-aukkoinen noin 200 m pitkä, Kymijoen ylittävä, vesistösilta Kuusankoskella. Mallinnuksen lähtötiedoiksi saatiin rakennussuunnitelma. Sillasta mallinnettiin vain sillan kansilaatta. Vaakageometria oli suora. Pystygeometria koostui suorasta ja ympyrän kaaresta $R=10\,000$ m. Mallinnus aloitettiin luomalla tien 3D-tasausviiva MicroStationiin suunnitelma-asiakirjojen mukaisesti. Tasausviivan avulla mallinnettiin tämän jälkeen tasausviivan kohdalla oleva kannen yläpinnan taiteviiva 3D-pursotuksen ohjauskäyrräksi. Sen jälkeen piirrettiin tarvittavat kannen poikkileikkaukset suunnitelmapiirustusten mukaisiksi. Poikkileikkausten välit pursotettiin MicroStationin omilla 3D-mallinnustyökaluilla. Malli tarkistettiin vertaamalla suunnitelma-asiakirjoissa esitettyihin mittatietoihin. Malli tehtiin suunnitelman mukaiseen siltapaikan koordinaattijärjestelmään.

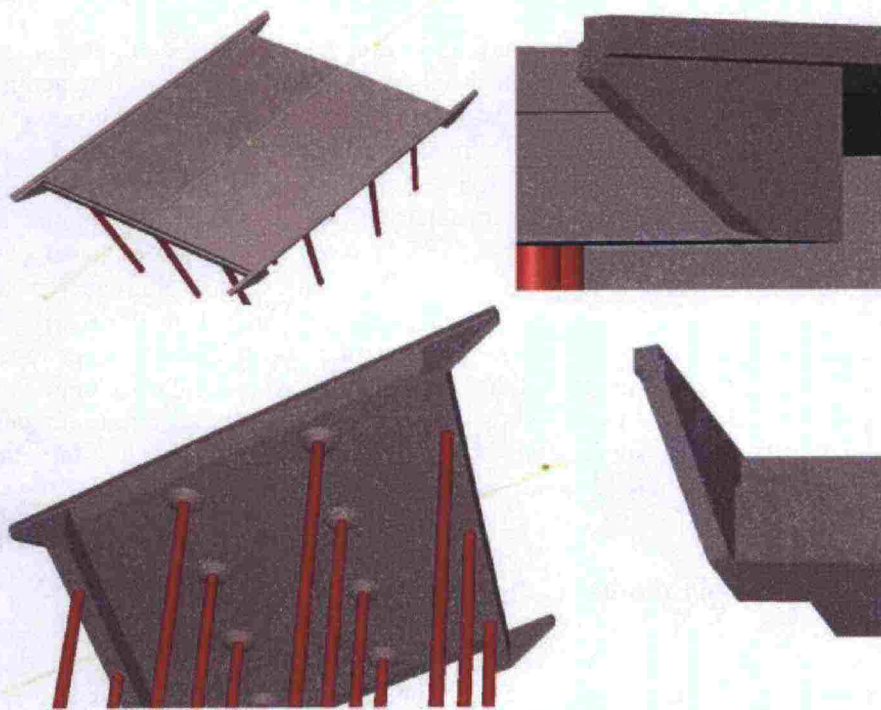
2.24 Xengineer-suunnitteluohjelman soveltuvuusarviointi

Tekla Oyj:n kehittämän uuden Xengineer-suunnitteluohjelman soveltuvuutta teräsbetonisiltojen suunnitteluun selvitettiin osallistumalla Teklan järjestämään kahden päivän koulutukseen. Koulutuksen aikana pyrittiin arvioimaan Xengineer-ohjelmiston soveltuvuutta erityisesti siltarakenteiden suunnitteluun. Koulutuksessa tutustuttiin ohjelmiston eri ominaisuuksiin ja käyttötapoihin. Lopuksi mallinnettiin kokeilunomaisesti tyypillisiä siltarakenteita.

2.3 Mittauskokeet työmaalla

2.31 Sillan paikalleenmittaus 3D-siltamallin avulla

Sillan paikalleenmittausta 3D-mallin avulla kokeiltiin S44-sillan, ns. Matinpartaan silta HAKI-projektissa Oulussa, työmaalla 27.5.2002. Tarkoituksena oli kokeilla sillan paikalleenmittausta siirtämällä mittautietoa suoraan suunnittelijan tekemästä 3D-mallista mittalaitteisiin. Sillan 3D-malli tehtiin SuunnitteluKORTES Oy:ssä Microstation V8-ohjelmalla. Mallin rakentamiseen käytettiin solid-elementtejä. Rakenteet mallinnettiin suoraan KKJ-koordinaatistoon, jossa mittayksikkönä oli millimetri.



Kuva 11. Näkymiä SuunnitteluKORTES Oy:n kehittämästä S44-sillan solidimallista.



Kuvat 12 ja 13. S44-siltapaikka. Vasemmassa kuvassa lyöntipaalujen paikalleen mittaus reaaliaikaisena CAD/CAM-kokeiluna käynnissä. Mittalaitteen näyttö oli kiinni prismatangossa, jonka prismamies siirsi vuorollaan kunkin suunnitellun paalupisteen kohdalle. Merkittyyn pisteeseen lyötiin lopuksi putkipaalu. Paalun sijainti tarkistettiin vielä riippumattomalla toisella takymetrillä (vihreä koje oikeassa kuvassa).

Mittauksia varten Terrasolid oli muuntanut siltamallin Microstation J7-muotoon ja skaalannut mallin metriseen järjestelmään. Muunnoksen syynä oli, että mittausohjelmisto perustui vielä J7-versioon. Oleellisin vanhemman ja uudemman tiedostomuodon ero on koordinaattien käsittelyssä. Vanhemmassa J7-versiossa suunnittelutila on rajallinen ja todellinen sijainti hoidetaan käyttämällä paikalliskoordinaatisto- ja mittayksikkömuunnosta. Uudemmassa versiossa ei näitä rajoituksia enää ollut. Koordinaattien oikeellisuus tarkistettiin vertaamalla mallin pisteitä tunnettuihin koordinaatteihin. Tämän jälkeen siirryttiin työmaalle. Siltapaikalla oli tehty maatöitä, mutta ei vielä varsinaisia sillanrakennustöitä.

Siltapaikalla mitattiin S44 Matinpartaan sillan pohjoisen päätytuen paaluja kokeiluluontoisesti paikalleen. Mittaus suoritettiin kahdella takymetrillä. Vertailulaitteena käytettiin Tieliikelaitoksen mittausteknikon käyttämä Leica-robotitakymetri.



Kuvat 14 ja 15. Kokeessa paikalleenmittaukset tehtiin Geotrim Oy:n Trimble-robotitakymetrillä. Mittaustulokset tarkistettiin välittömästi Leica-robotitakymetrillä.

Takymetri orientoitiin paikalleen kahden maastossa olevan kiintopisteen avulla. Tämän jälkeen voitiin aloittaa mittaukset. Terrasolidin tietokone ja takymetri kytkettiin toisiinsa tiedon siirtämistä varten. Tietokoneella käynnistettiin mittaukseen tarvittava ohjelmisto ja avattiin siltamalli. Siltamallista valittiin haluttu mitattava piste (paalun keskipiste) ja lähetettiin takymetrille mittauskomento, jolloin takymetri kääntyi automaattisesti haluttua mittapistettä kohti. Prismantunnistuksen avulla mitattiin piste paikalleen.

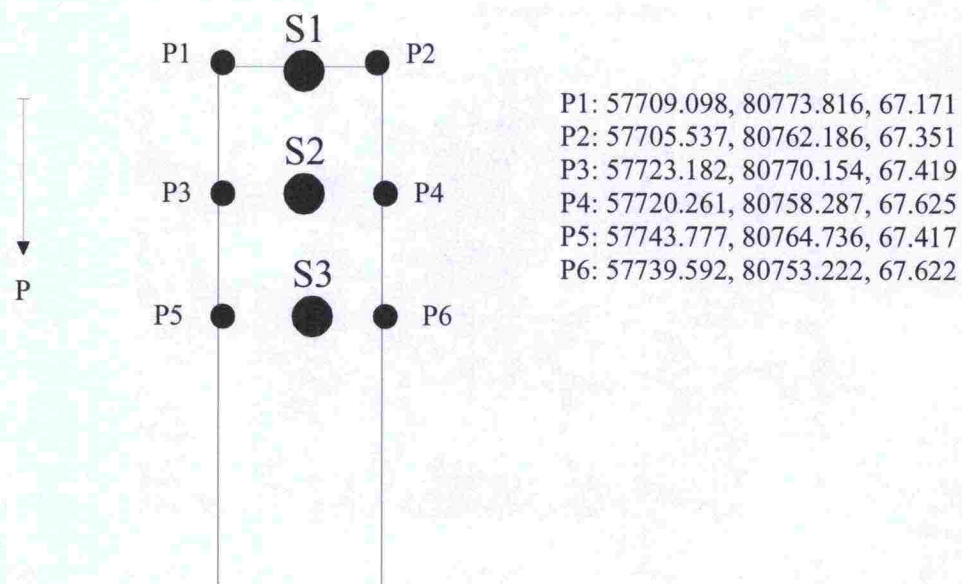


Kuvat 16 ja 17. Vasemmassa kuvassa näkymä kiintopisteelle. Oikeassa näkyy tarvittavaa mittaus- ja PC-laitteistoa.

Suoritettu ”mittauspilotointi” onnistui suunnitellusti. Sää mittaushetkellä oli kesäinen. Kirkas auringonpaiste asetti kannettavan tietokoneen sijoittelulle vaatimuksia. Tietokone sijoitettiin takymetrin vieressä olevan pakettiauton tavaratilaan varjoon, jolloin näyttö saatiin näkymään paremmin. Todennäköisesti jatkossa maastokäyttöön tarkoitetuissa laitteissa ei tätä ongelmaa enää ole. Siitä osoituksena oli, että mukana olleen Pocket PC –laitteen näytön todettiin toimivan erinomaisesti myös kirkkaassa auringonpaisteessa.

2.32 Pessankosken sillan Callidus-laserkeilaus

Pessankosken sillan laserkeilauskoe suoritettiin 10.6.2002 Skanska Tekra Oy:n työmaalla Kymijoella, Kuusankoskella. Kokeessa testattiin Terrasolid Oy:n omistamaa Callidus-laserkeilaimen soveltuvuutta suurehkon vesistö sillan tarkistusmittaukseen. Sää oli kokeen aikana puolipilvinen ja etupäässä aurinkoinen, lämpötila noin +20...+23°C, tuuli kohtalainen. Tietokoneen näyttöä jouduttiin suojaamaan auringon valolta mustilla laukuilla ja vastaavilla. Mittauskohteena oli sillan kansi päältäpäin. Kansi oli pinnoitettu kauttaaltaan mustalla bitumikermillä, joka sinänsä on optiseen mittaukseen erittäin vaativa pinnoite. Mittaukset (täysi ympyrä) suoritettiin kolmesta (3) kojeasemasta sillan eteläpäästä lähtien noin 50 m matkalla. Sillan kokonaispituus noin 200 m. Koordinaatiston kiinnittämispisteet mitattiin Leica TCRM1103 plus –takymetrillä kahdesta jokaisen kojeaseman kohdalle asennettujen mittauskartioiden keskipisteestä.



Kuva 18. Mittauksen kojeasemat S1...3 ja koordinaatiston kiinnittämispisteet P1...6.

Ensimmäinen mittaus aloitettiin klo 12:15, toinen mittaus päättyi 13:20, 3. mittaus alkoi 13:30 ja päättyi 13:56 eli yhden skannauksen kesto oli noin 26 minuuttia. Sillan päällysrakenteissa havaittiin silmämääräisesti selviä muotopoikkeamia.



Kuva 19. Pessankosken sillan laserkeilauskoe: Callidus-laserkeilain kojeasemalla S1.



Kuva 20. Callidus-laserkeilausjärjestelmän käyttöliittymä ja sen suojaus auringonvalolta.



Kuva 21. Muotopoikkeamia havaittiin silmäääräisesti tarkasteltuna selvimmin sillan reunapalkissa ja kaiteessa.

2.33 S44-pilottisillan Callidus-laserkeilaus

S44-pilottisillan Callidus-laserkeilauskoe suoritettiin 29.04.2003 Liminka-Oulu – moottoritietyömaalla. Mittausolosuhteet olivat erittäin huonot: lämpötila $\pm 0^{\circ}\text{C}$, voimakas tuuli sekä vesi- ja räntäsade. Mittausvälineinä käytettiin Callidus-laserkeilausjärjestelmän lisäksi Trimblen ja Leican robottitakymetreit. Virtalähteeksi laserkeilaimelle tarvittiin polttomoottorikäyttöinen aggregaatti.

Laserskannauksen tavoitteena oli kokeilla valetun sillan kannen ja siipimuurien mittojen ja muotojen tarkistusmittausta. Mittaus aloitettiin alustamalla mittalaitteet. Mittaukset tehtiin sillan toisen päädyn osalta kahdella eri paikalta tehdyllä

laserkeilauksella. Lisäksi takymetrillä mitattiin skannauksessa käytettävien lieriöiden paikkatiedot pistepilven myöhemmän orientoinnin toteuttamiseksi. Tavoitteena oli jalostaa mitta-aineistot myöhemmin siltarakenteita kuvaaviksi geometrisiksi elementeiksi, joita voitaisiin sitten verrata sillasta tehtyyn 3D-suunnitelmamalliin. Sillan kannen muotoja skannausalueelta mitattiin molemmilla takymetreillä referenssitiedoksi skannausaineistolle.



Kuva 22. Laserskannaus Haki-työmaan silta 44 käynnissä. Vasemmalla Callidus-laserskeilain ja oikealla pisteaineiston paikannuksessa tarvittavat lieriöt. Mittauspäivän sää oli sateinen ja kylmä. Huono sää huonontaa laserkeilauksen lopputuloksen tarkkuutta.



Kuva 23. Keilauksessa käytettävien lieriöiden paikat mitattiin takymetrillä.

2.34 S44-pilottisillan Cyrax-laserkeilaus

Laserkeilauskoe suoritettiin tiistaina 27.5.2003 Oulun moottoritien laajennukseen sisältyvällä S44-siltatyömaalla. Kokeeseen osallistuivat Joala Vahuri Leica Nilomark Oy:stä, Pasi Veijo Tieliikelaitokselta, Rauno Heikkilä Oulun yliopistosta

sekä Antti Karjalainen ja Harri Viljamaa SuunnitteluKORTES Oy:stä. Keilaimena käytettiin Leica Nilomark Oy:n sektorityyppinen Cyrax-laserkeilainta. Cyrax-keilaimella on oma virtalähde, joka riittää noin 10 h mittauksiin. Keilaimen on kytketty normaali PC-tietokone, jolta keilaimen eri toimintoja ohjataan. Mittaustulokset tallentuvat suoraan PC:lle. Mittauskohteena oli valettu teräsbetonisilta, jonka pinnat olivat puhtaat ja kuivat. Sää kokeessa oli aurinkoinen ja kirkas – jopa niin kirkas, että ajoittain oli vaikea nähdä PC:n näytöltä yhtään mitään. Kokeen ajan puhalsi voimakas länsituuli ja lämpötila oli noin +15 °C.



Kuva 24. Laserkeilaus käynnissä hieman S44-sillan kannen yläpuolelta kaakosta. Mittaustuloksia saatiin yhdellä keilauksella noin 40°-keilaussektoriin näkyvistä pinnoista. Voimakas puuskittainen länsituuli saattoi vaikuttaa mittaustarkkuuteen.

Mittauksen tavoitteena sillan 3D-sijainnin ja -muodon mittaaminen sekä vertaaminen 3D-suunnitelmamalliin, aiemmin Callidus-keilaimella saatuihin mittaustuloksiin sekä robottitakymetrillä saatuihin mittaustuloksiin. Erillisiä keilauksia suoritettiin kaikkiaan 14 kpl sillan joka puolelta. Kaikkiaan mitattujen mittauspisteiden määräksi arvioitiin noin 6-7 miljoonaa.

Mittauksen aluksi koje asennettiin joko jalustalle tai suoraan maahan sopivaan paikkaan siten, että kulloinkin toivottu näkymä saavutettiin. Keilaukset tehtiin suoraan työmaakoordinaatistoon. Keilauksissa saadut pistepilvet yhdistetään toisiinsa tähyksen koordinaattien avulla. Takymetri orientoitiin aluksi työmaan peruspisteisiin, jonka jälkeen kaikkien käytettyjen tähyksen paikat mitattiin keilausten edetessä. Mittalaitteena käytettiin tällöin prismattomaan mittaukseen kykenevää Leica-takymetrillä. Oleellista oli tällöin, että asennetut tähykset näkyivät sekä takymetrille että keilaimelle. Takymetrin orientoinnin jäännösvihreiksi jäivät x-koordinaatin suhteen 1 mm, y-koordinaatin suhteen 3 mm, x-koordinaatin suhteen 1 mm. Mittakaavavirheeksi arvioitiin 40 ppm.

Käytetyn Cyrax-keilaimen mittaustarkkuus oli kalibroitu TKK:n Geodesian laboratoriossa, jonka tulokset on myös julkaistu FIG'2003 -konferenssissa. Nyrkkisääntönä mittaustyömenekkiin on 3 keilausta/h. Täysi keilaus 1000x1000 pistettä kestää 12 minuuttia. Kokeessa mittaustiheytenä käytettiin 1 cm/11 m etäisyydellä. Pallo- ja tarratähyksiä asennettiin keilausten edetessä tarpeen mukaan koko ajan lisää siten, että jokaisesta keilauksesta näkyi ainakin 3 tähyistä. Aluksi keilattiin valokuvan perusteella valittu koko mittauss sektori, sen jälkeen Cyraxin ohjelmisto etsi ja tunnisti automaattisesti näkyvät tähykset, jonka jälkeen tähyksen keskipisteet mitattiin vielä tarkemmin erikseen kahdella automaattisella keilauksella. Kojeasemien hakeminen osoittautui mittausten suorittamisen tärkeimmiksi

työvaiheiksi. Oleellista on koko sillan kattavien näkymien saavuttaminen. Kokemuksen myötä sopivat keilausasemat ja –sektorit löytää varmasti nopeammin.



Kuva 25. Keilaus sillan kannen alapuolelta kaakosta. Keilain akkuineen sekä mittamies mahdollisimman hyvissä asemissa. Keilainta ei tarvitse tasata. Kuvasta voidaan havaita myös käytettyjä tähyksiä. Parhaimpien kojeasemien ja näkymien löytäminen on keskeinen osa laserkeilaajan työtä. Katveet on havaittava muista kojeasemista.

Auringonvalon osuminen keilaimen suojalasiin estettiin varjostimella. Suora auringonvalo olisi huonontanut mittaustarkkuutta. Mittaukset kannattaisikin mahdollisuuksien mukaan suunnitella siten, että suoraan aurinkoa vasten ei jouduttaisi mittaamaan. Voimakkaan tuulen arvioitiin huonontaneen jonkin verran mittaustarkkuutta. Kokeessa käytetyn kannettavan tietokoneen akun varaus loppui kesken 2 h 39 min kuluttua keilausten aloittamisesta. Vara-akku ei ollut, jolloin akku ladattiin lounaustauolla huoltoasemalla. Mittaus sektorikeilaimella vaikutti hyvin toimivalta ja tehokkaalta. Koko sillan 3D-mittaus vei aikaa karkeasti yhden työvuoron. Tähyspaikannus takymetrillä ei olisi ollut välttämättä tarpeen ellei tuloksia olisi haluttu suoraan työmaakoordinaatistoon.

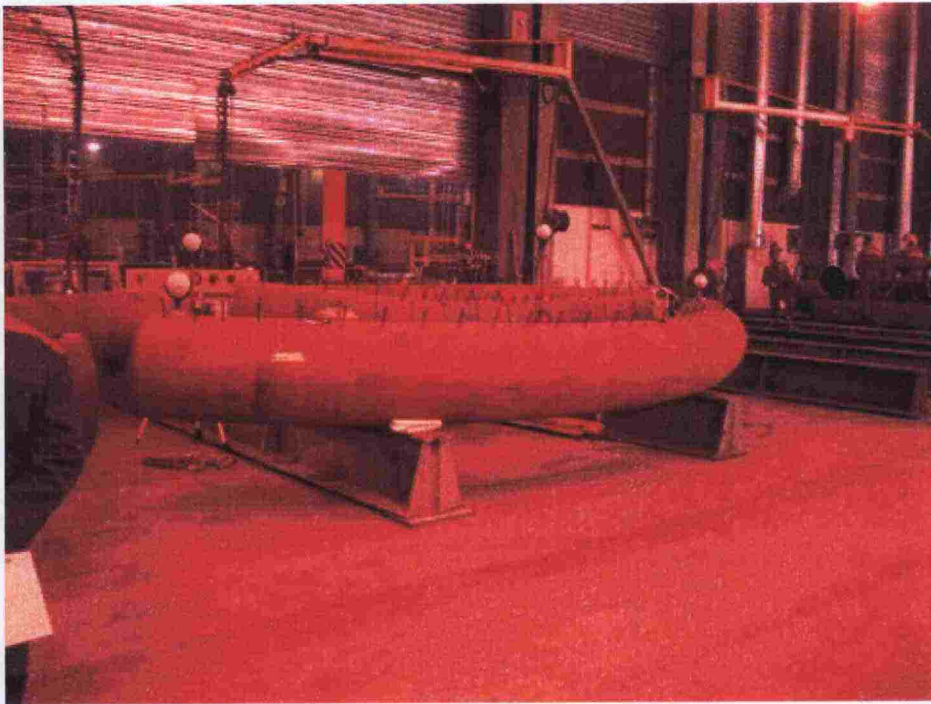


Kuva 26. Keilainjärjestelmässä käytetyt pallo- ja tarratähykset.

2.35 Terässiltalohkon Cyrax-laserkeilaus

Terässiltalohkon laserkeilauskoe suoritettiin 4.9.2003 PPTH Oy:n Kalajoen konepajalla. Tässäkin kokeessa keilaimena käytettiin Leica Nilomark Oy:n Cyrax-laserkeilainta (sektorimittausperiaate). Mittauksen tavoitteena oli spiraalimaisen siltalohkon 3D-sijainnin ja -muodon mittaaminen sekä edelleen vertaaminen Xsteel-ohjelmalla tuotettuun 3D-suunnitelmamalliin.

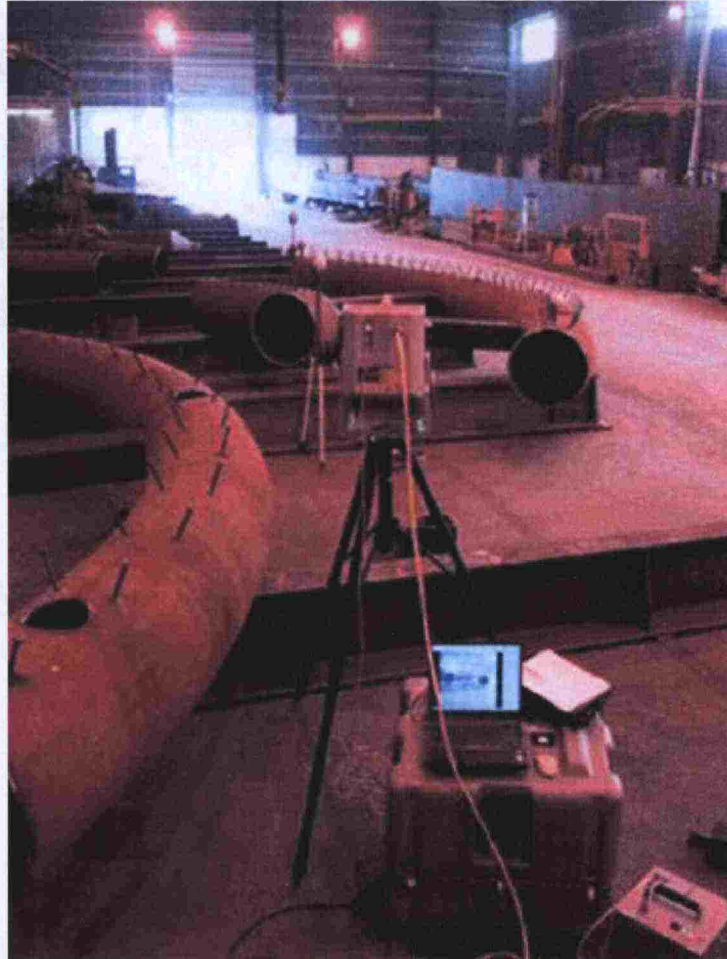
Laserkeilauksia suoritettiin kaikkiaan 5 kpl. Keilauksissa saadut pistepilvet yhdistetään toisiinsa tähysten avulla. Mittausalueelle spiraalin ympärille asennettiin 4 puolipallotäystä ja 2 tähystarraa. Hallin sisälämpötila noin + 10°C. Mittauskohteeksi valittiin sopivasti esillä oleva LL4-spiraalilohko (valmistettu 2 kpl). Materiaalina oli Rautaruukin teräs. Lohkon taivutus oli suoritettu Iso-Britanniassa, kokoonpano ja pintamaalaus Kalajoella, josta edelleen oli järjestetty kuljetus Riikaan asennustyömaalle. Spiraalimaisen lohkon pituus noin 7 m, sisäkaaren säde 4,5 m, ulkokaaren säde 6,5 m, nousukulma 8-12 %, paino 3000 kg sekä seinämävahvuus sisäkaarteessa 20 mm ja ulkokaarteessa 16 mm. Putkien poikkileikkaus ovaalinmuotoinen. Valmistustoleranssi oli luokkaa ± 5 mm.



Kuva 27. Mittauskohteeksi valittu LL4-spiraalilohko. Lohkon ympärille ja osittain sisäpuolelle asennettiin 4 puolipallotäystä ja 2 tarratäystä.

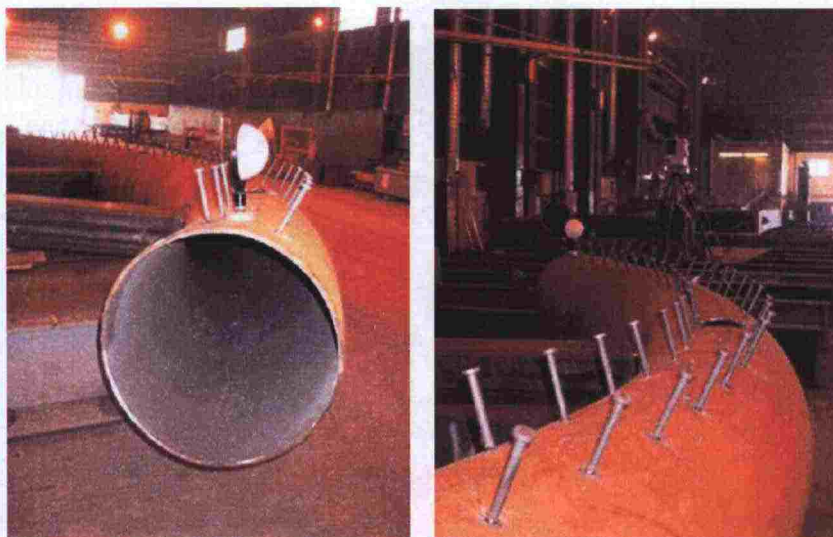
Ensimmäinen keilaus aloitettiin 09:47 kojeasemasta K1. Ilmeisesti keilaimen virrankytkeksen jälkeisestä siirrosta johtuen ohjelmisto meni kuitenkin pian jumiin. Tietokone ja keilain sammutettiin ja käynnistettiin uudelleen. Toinen keilaus toteutettiin kello 10:05-10:19. Keilauksen jälkeen suoritettiin tähysten tunnistamiseen ja tarkemittaamiseksi tarvittavat toimenpiteet. Kolmas keilaus suoritettiin 10:43-10:54 kojeasemasta K2. PC:n akku loppui kesken analysoinnin ja tietokone meni "hibernating"-tilaan ja samalla skanneri jumiin. Tietokone kytkettiin verkkovirtaan. Tämän jälkeen suoritettiin uusi "harva" skannaus, jonka avulla löydettiin tähykset. Keilaus saatiin kuitenkin vietyä loppuun kello 11:30 mennessä. Neljäs keilaus suoritettiin kojeasemasta K3 kello 12:40. Viides keilaus suoritettiin kojeasemasta K4 13:05-13:20.

Keilauksen aikana syntyi idea, että jos mitattaisiin vastaavasti kaikki lohkot, voitaisiin yhteensovitus ja mahdollinen hienosäätösuunnittelu tehdä CAD:ssä. Kaikkien spiraalilohkojen mittauksessa ongelmana olisi konepajalla ollut näkymän saanti jokaiseen lohkoon joka puolelta. Myös koordinaatiston kiinnittämispisteet kannattaisi mitata lohkoihin valmiiksi. Tämä nopeuttaisi analysointia.



Kuva 28. Keilaus käynnissä kojeasemalla K4. Keilainta käytettiin täysin PC:n avulla. Keilaimen kuljetusalusta toimi samalla hyvänä työpöytätasona.

Lohkoja yhteenliitettäessä hitsausaumoilla voi korjata muotoa jonkin verran. Hitsauskutistumat ei tällaisilla elementeillä merkityksellisiä. Levyseppä voisi hyödyntää poikkeamatuloksia esimerkiksi päiden korjauksessa. Keilaussäteeseen nähden viistot pinnat generoivat keilaukseen (etäisyysmittaukseen) lisävirhettä: mitä viistompi mittaus, sitä enemmän mittausvirhettä. Konepaja voisi mahdollisesti hyödyntää tämäntyyppistä mittaustekniikkaa mahdollisten hienosäätötoimien lisäksi jo tarjousvaiheessa (valmistustarkkuuden toteamisen tekniikka).



Kuvat 29 ja 30. Vasemmassa kuvassa LL4-spiraalilohkon pää. Ympyräpoikkileikkaus on taivutuksessa muuttunut ovaalinmuotoiseksi noin 10 mm verran. Oikeanpuoleisessa kuvassa näkyvät betonin tartuntateräket. Näiden sijaintitarkkuudelle ei asetettu suuria tarkkuusvaatimuksia – ainoastaan riittävä määrä oli merkityksellistä.

2.4 Muut työmaahavainnoinnit

2.41 Hausjärven ratasillan lyöntipaalutus

Ratasillan lyöntipaalutusta havainnoitiin 26.4.2003 Hausjärvellä, Oitissa. Toisen raiteen liikennekatkon pituus oli perjantaista maanantaihin. Tavoitteena oli havainnoida erityisesti siltatyömaan paalutustyössä esiintyviä geometrianhallintatehtäviä.

2.32 Kuukson ratasillan tunkkaus

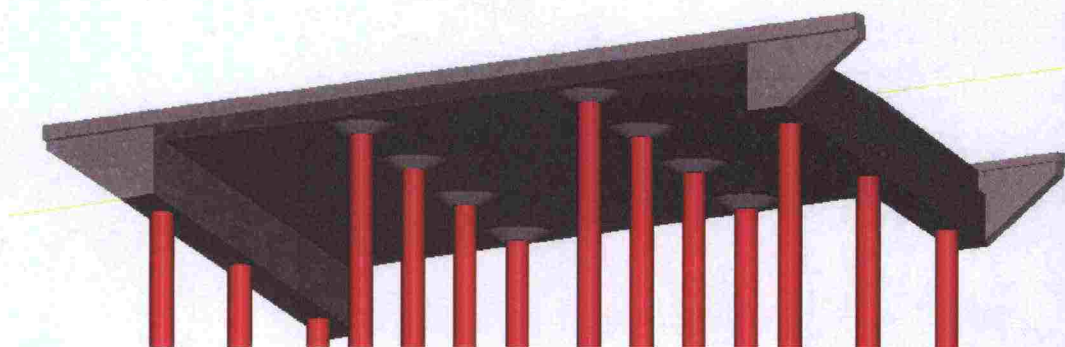
Ratasillan tunkkausta koskeva työmaahavainnointi suoritettiin Iitissä, Kausalassa, Kuukson siltatyömaalla 16.8.2003. Tavoitteena oli havainnoida ratasillan siirrosta esiintyviä geometrianhallintatehtäviä.

3 TULOKSIA JA HAVAINTOJA

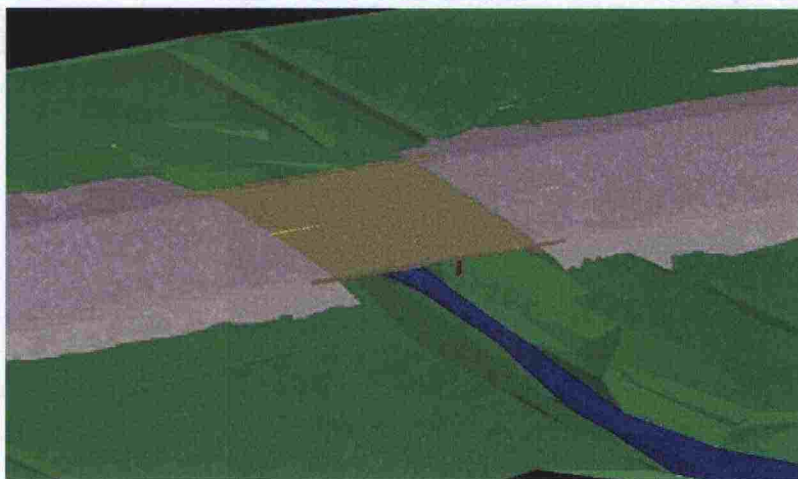
3.1 Suunnittelu- ja mallinnuskokeiden tulokset

3.11 S44-pilottisillan mallinnus

S44-pilottisillan mallinnus oli projektissa tehty ensimmäinen mallinnuskoe, johon sisältyi tutustumista MicroStation-ohjelmaan sekä geometrian mallinnustavan suunnittelua. Maastomallin sisäänluku ja tarkastelumahdollisuus visuaalisesti yhdessä tie- ja siltamallien kanssa antoi suunnittelulle lisävarmuutta. Mallin geometriatietojen vienti varsinaiseen rakennussuunnitteluun AutoCAD-ohjelmaan onnistui hyvin. Malli helpotti geometriatietojen muodostusta ja piirustuksiin määrittämistä.



Kuva 31. S44-pilottisillan 3D-malli.

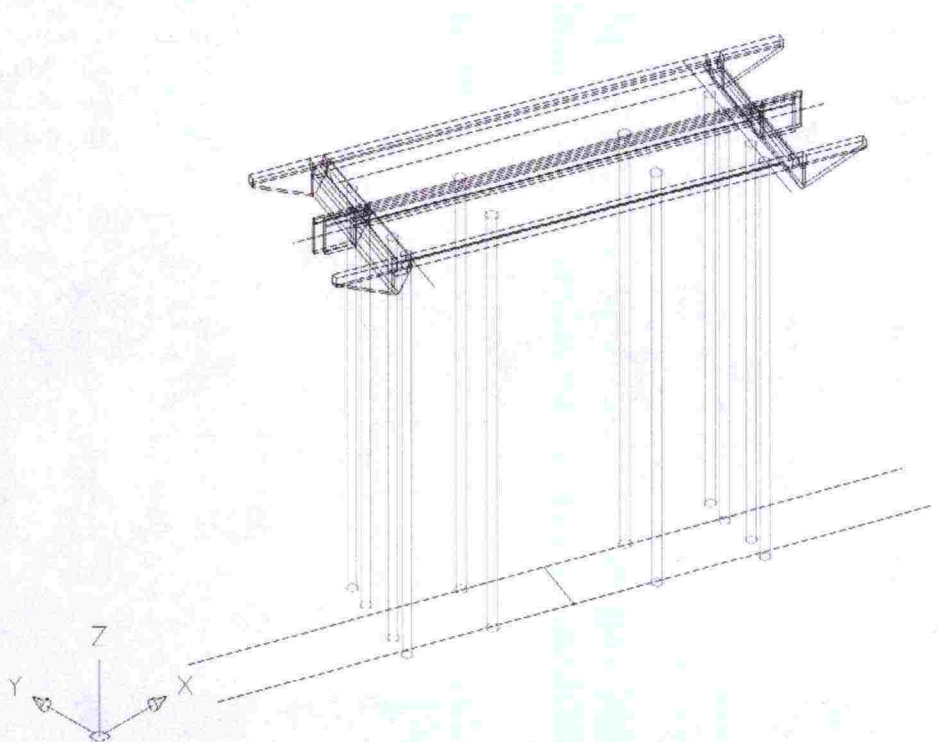


Kuva 32. S44-pilottisillan tilavuusmalli (ruskea), tiemalli (harmaa) ja maastomalli (vihreä) samaan kuvaan sovitettuina.

Malli kannattaa tehdä suoraan oikeaan koordinaatistoon käyttäen mittalaitteiden metristä järjestelmää. Tällöin vältetään kaikilta myöhemmiltä muunnostöiltä. Lisäksi käytetty tasojärjestelmä ja attribuuttitieto tullaan ottamaan mukaan helpottamaan tiedonkäsittelyä. Tällöin malliin saadaan myös enemmän "älykkäitä" ominaisuuksia.

3.12 Kuukson ratasillan mallinnus

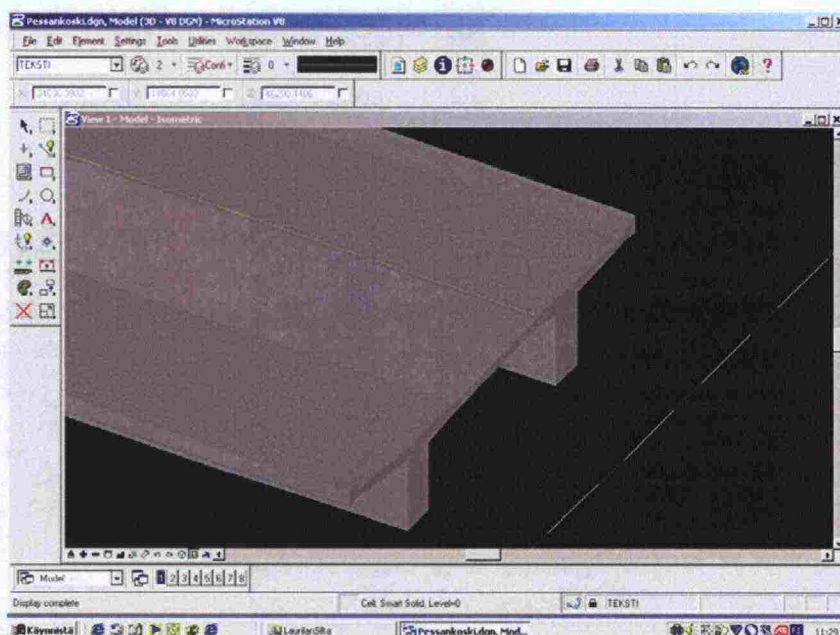
Kuukson ratasillat (kuva) olivat geometrialtaan helppoja. Vaaka- ja pystygeometriat olivat suoria. Mallinnus MicroStation-perustyökaluilla onnistui helposti. Työläimmiksi osoittautuivat reunapalkit ja siipimuurit, jotka olivat kuitenkin geometrian yksinkertaisuuden vuoksi nekin helppoja toteuttaa. Mallinnustyötä olisi jonkin verran nopeuttanut, jos ratalinja ja paalujen koordinaatit olisi helposti esimerkiksi jonkun apuohjelman avulla voitu suoraan lukea lähtötietoina sisään. Mallin vientiä rakennussuunnitteluun ei tässä pilotissa voitu kokeilla.



Kuva 33. Kuukson ratasillan 3D-tilavuusmalli kuvassa ns. rautalankamallina tulostettuna.

3.13 Pessankosken siltakannen mallinnus

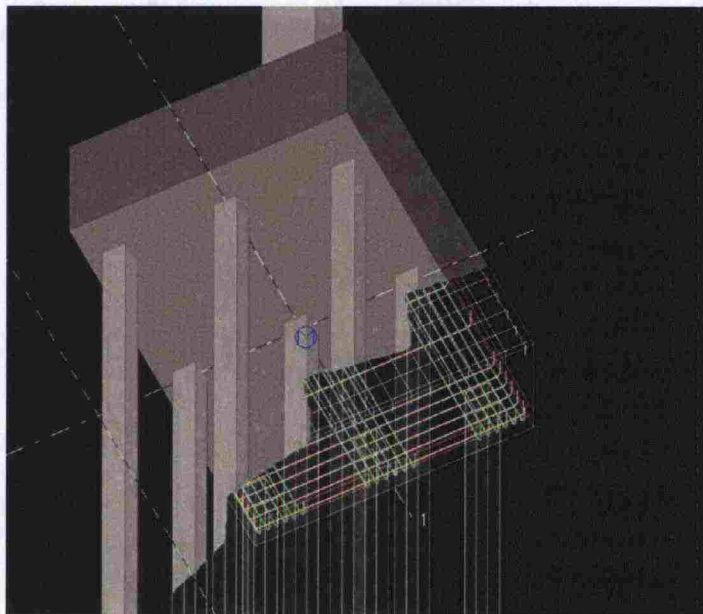
Pessankosken siltakannen mallinnus oli jonkin verran Kuukson ratasiltaa vaativampi johtuen pystygeometrian muuttumisesta sillan kohdalla. Maatukia ja alusrakenteita ei malliin sisällynyt. Mallinnusta olisi helpottanut pursotusten ohjauskäyrien luonti automaattisesti sisäänlukemalla tiegeometriatiedot.



Kuva 34. Pessankosken sillan 3D-tilavuusmalli. Kuvassa kannen pääty.

3.14 Xengineer-suunnitteluohjelman soveltuvuus sillansuunnitteluun

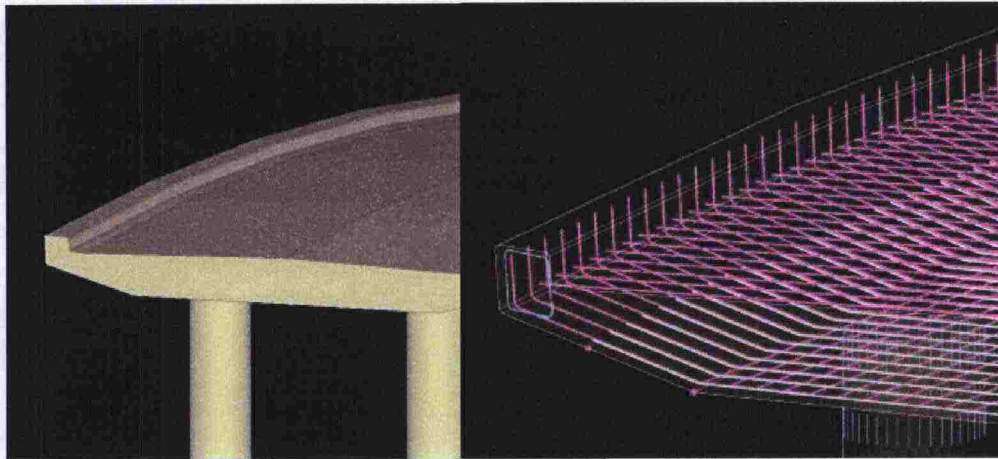
Sillan 3D-suunnittelu asettaa käytettäville ohjelmille mittavia haasteita tyypillisesti monimutkaisen siltageometrian vuoksi. Suoraviivaisia betonirakenteita silloissa on yleensä vain alusrakenteissa, jos niissäkään. Tämä hankalien muotojen hallinta onkin yksi tärkeimpiä kriteereitä valittaessa suunnittelutyökaluja.



Kuva 35. Xengineer-ohjelmalla mallinnettu teräsbetonirakenne.

Kokeillun Xengineer-ohjelman (kokeessa betaversio) kehitystyö näyttää keskittyneen luonnollisesti talo- ja teollisuusrakenteiden puolelle, onhan siellä odotettavissa olevat markkinat suuremmat. Ohjelman kehityksessä näyttää myös pyrityn ottamaan vaikeidenkin paikallavalettujen betonirakenteiden tarpeita

huomioon. Nykyisellään Xengineer näyttäisi soveltuvan geometrialtaan helpohkojen siltojen detaljisuunnitteluun. Yksinkertaisten rakenteiden detalji- ja raudoitussuunnittelu onnistuu ja mallista automaattisesti saatavat ominaisuus- ja määrätiedot tuovat suunnitteluun varmuutta. Monimutkaiset, kahteen suuntaan kaarevat, tien siirtymäkaaren geometriaa noudattavat ja muuttuvaleveysiset siltakannet tuottavat jo enemmän vaikeuksia.



Kuva 36. Xengineer-ohjelmalla mallinnettu teräsbetonisilta ja sen raudoitetta.

Xengineeriä kannattaisi aluksi kokeilla jonkin geometrialtaan yksinkertaisen sillan suunnittelussa. Kohteena voisi olla teräsbetonikantinen liittopalkkisilta. Piirustusten viimeistely voisi aluksi olla aika työlästä, mutta jatkossa opittujen asetusten avulla onnistuisi helpommin. Käytettävyydeltään Xengineer edustaa CAD-ohjelmien parhaimmistoa. Visuaalinen raudoitteiden yms. mallintaminen vähentää varmasti virheitä.

Suunnittelussa ilmeneviä ohjelman jatkokehitysehdotuksia kannattaisi lähettää ohjelman kehittäjälle. Siltageometrian siirtoa toisesta CAD-ohjelmasta voisi kehittää helpommaksi ja sujuvammaksi. Siirrettävästä muodosta tulisi voida tehdä helppo muunnos Xengineerin betoni- tai teräsosaksi mallintamatta rakennetta uudelleen. Raudoitteiden mallinnukseen voisi lisätä automaattisen jaottelun varastotankoihin (12 m tangot + tarvittavat jatkokset). Kurssille käytössä ollut Xengineer 2.1 beta3 -versio näytti jo aika käyttökelpoiselta tuotteelta. Lähiaikoina lupailtiin jo käyttäjille suunnattu RC-versio (Release Candinate). Kurssille keskityttiin vain betonirakenteisiin. Käytössä oli myös Staad-moduuli. Xengineerillä onnistuu jo nyt mm. seuraavien, lähinnä talo- ja teollisuuspuolen, rakenteiden mallinnus: peruslaatat, anturat, ontelolaatat jopa makrolla valitulle alueelle, suorakaidepilarit, palkit (myös leukapalkit), TT-laatat, betoniportaat sekä vapaamuotoiset laatat.

Valmiina olevia liitos- ja mallinnusmakroja on mm. palkkikonsolin, palkin ja pilarin perusraudoitteiden (pääteräokset, haat), anturan (myös paalutetun) raudoitteiden, laatan raudoituksen, pilarin kiinnitysterästen sekä yksittäisten tai ”sarja”terästen ja verkkojen mallintamiseen. Kuormien mallinnus hoidetaan ns. Staad-moduulissa (tavanomaisten kuormien lisäksi ominaisuuden myös tuulikuormagenerointi korkeuden ja muiden arvojen mukaan).

Testissä hyväksi koettuja ominaisuuksia ovat mm. uudet yleispätevät parametriset liitokset tai detaljit. Mittoja, materiaaleja, raudoitteita yms. voi automatisoida poimimalla arvoja pääosista ja käyttämällä ”perusmatematiikkaa”. Esimerkiksi betonipilarin palkkikonsolista voi tehdä parametrisen liitoksen, jossa liitosta tehdessä syötetään vain tarvittavat arvot (esim. tartuntateräksen koko, reiän koko, konsolin pituus, raudoitteiden lukumäärä) ja makro huolehtii lopusta määrittelyjen

mukaan (mm. poimii betoniluokat pääosalta, sijoittaa määritetyt raudoitteet). Vapaamuotoisesta levystä voi muodostaa makrolla profiilin. Makrolla tehty raudoitus myös elää muutosten mukaan. Esimerkkeinä mainittakoon anturan koon muutos, paalun sijaintimuutos ja laatan reiän muutos.

Staad-moduuli toimi kokeissa hyvin. Kuormat ja tukiehdot voi mallintaa ja luoda laskentamallin halutuista osista kuten esimerkiksi betonirakenteista ja teräsosista erikseen. Laskentatuloksia tarkastellaan pääosin Staadin ”jäkiprosessorilla”, mutta tulokset saa tietysti Xengineerin puolelle esim. makroiin, joissa liitos käyttäytyy laskentatulosten mukaan. Myös optimointi toimi, esim. käyttöasteen ylittyessä voi ko. profiilia olevat osat muuttaa kerralla halutuksi ja suorittaa sitten laskennan uudelleen. Puutteita oli vielä mm. pyöreän pilarin mallinnuksessa ja raudoituksessa (tulossa piakkoin), vaikeiden muotojen mallinnuksessa kuten kahteen suuntaan kaarevat profiilit (tulossa oli ns. sketch-profile eli voi piirtää muodon jota käyttäen sitten mallinnetaan profiililla). Kaarevien muotojen raudoitus teettää tietenkin työtä, mutta esimerkiksi kaarevan siltakannen alapinnan terästen mallinnus yhdellä sarjalla onnistui.

Talo- ja teollisuusrakenteiden suunnitteluun ohjelma vaikutti hyvin käyttökelpoiselta. Käyttöönottoa harkittaessa kannattaa ottaa huomioon, että tarvittavien piirustusasetusten luontiin on syytä varata reilusti aikaa, samoin tarvittavien parametristen liitosten ja detaljien tekoon. Siltasuunnittelussa Xengineeriä voisi kokeilla jonkin ”helpon” sillan mallintamisessa. Hyötyä tulisi mm. automaattisesta määrälaskennasta (betoni, raudoitteet) ja betoniteräsluetteloista. Visuaalinen raudoitteiden yms. mallintaminen vähentää varmasti virheitä.

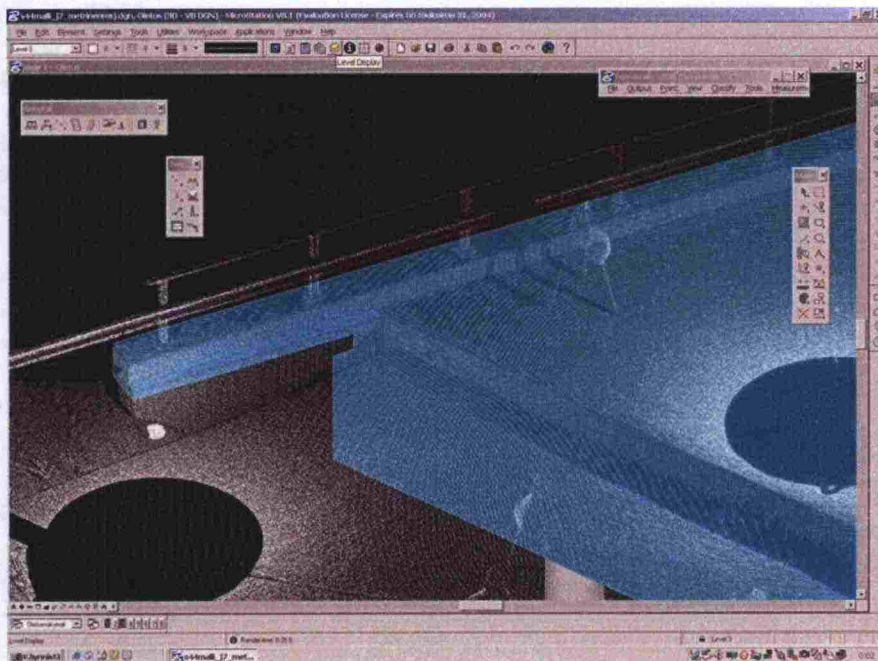
3.2 Pessankosken sillan laserkeilaustulokset

Pessankosken sillan laserkeilauskoe tehtiin Callidus-keilaimella. Tähyskarttioiden koordinaattipisteet mitattiin takymetrillä. Koordinaatteihin jäi kuitenkin mahdollisesti manuaalisesta muistiin kirjauksesta tai muista epäselviksi jääneistä syistä johtuneita virheitä. Lopullista pistepilven tulostusta ja poikkeamien laskentaa ei voitu tehdä.

Pallomaisen laserkeilaimen mittausperiaate ja ominaisuudet vaikuttivat jonkin verran riittämättömiltä suuren vesistö sillan mittaustehtäviin. Leveä joki yhdessä suuren virtaaman kanssa rajoittivat käytännössä mittalaitteiden kojeasemien sijoittelua oleellisesti. Ainakin mittausetäisyydet kasvavat. Katveja jäänee jonkin verran siitä huolimatta, että mittausalueet lähitulevaisuudessa pitenisivät.

3.3 S44-pilottisillan Callidus-laserkeilaustulokset

Callidus-laserkeilauksessa S44-pilottisillalla mittausolosuhteet olivat erityisen huonot. Käytetty outo takymetri otettiin suoraan tehdaspakkauksesta uutena käyttöön, aikaa kului mm. virransaannin järjestämiseen (aggregaatti) sekä sillan kansi jouduttiin puhdistamaan ennen kokeita. Tuloksia tarkasteltaessa osoittautui, että mittauskartioiden koordinaatteihin jäi kokeessa karkeita virheitä. Keilaukset voitiin kuitenkin yhdistää toisiinsa ja kuva on sinänsä havainnollinen. Mittapoikkeamia ei tuloksista kuitenkaan voida kokonaisvaltaisesti laskea.

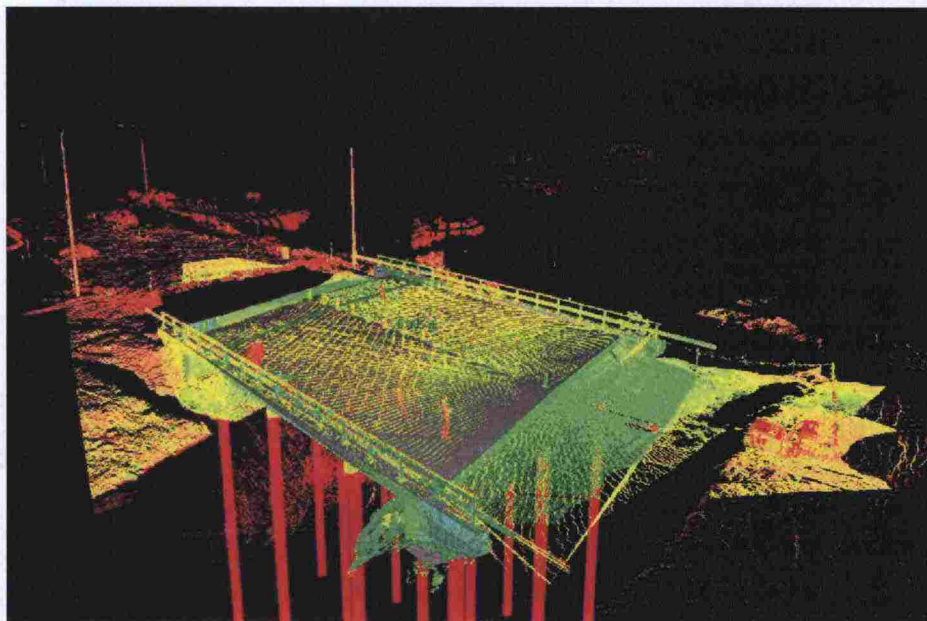


Kuva 37. S44-sillan Calliduksella mitattua 3D-pistepilvettä. Kuvassa näkyvät mustana pallomaiseen keilaukseen jäävät katvealueet.

Yleisenä havaintona oli että Callidus-keilaimen käyttö sillan skannaukseen vaikutti melko työläältä. Lieriöiden paikat on mitattava myös takymetrillä. Mittausperiaatteeltaan pallomaisen Callidus-keilaimen mittausa voi kohdentaa esimerkiksi sillan tiettyihin rakenteisiin. Tämän tyyppinen koje soveltunee paremmin tilamittaukseen ja tunnelimittaukseen. Uusissa Callidus-keilaimissa ominaisuudet ovat kokeessa käytettyyn keilaimeen nähden parantuneet, joten yleisiä johtopäätöksiä ei näistä havainnoista kannata vielä tehdä.

3.4 S44-pilottisillan Cyrax-laserkeilaustulokset

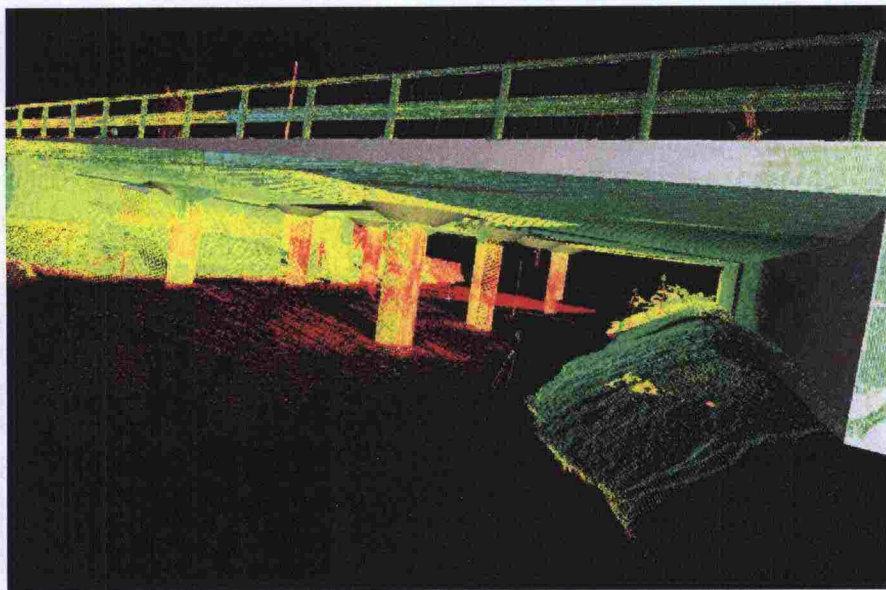
S44-pilottisillan laserskannaustulokset analyysissa mittaustuloksia verrattiin SuunnitteluKORTES Oy:n kehittämään sillan solidimalliin. Sillasta tehty 14 eri keilausta yhdistettiin (rekisteröinti) tähyksien koordinaattien avulla yhdeksi 3D-pistepilveksi. Analyysissa yhdistäminen vei järjestelmän CYCLONE-ohjelmiston avulla aikaa noin 50 minuuttia.



Kuva 38. S44-sillan mitattu 3D-pistepilvi (vihreät ja keltaiset pisteet) ja suunniteltu solidimalli (harmaa ja punainen) samassa kuvassa ja koordinaatistossa. Poikkeamat näkyvät kannen pinnalla siten, että harmaassa laatan kohdassa mitattu laattapinta on suunniteltua alempana. Jos taas vihreät pisteet näkyvät, mitattu laattapinta on suunniteltua ylempänä.

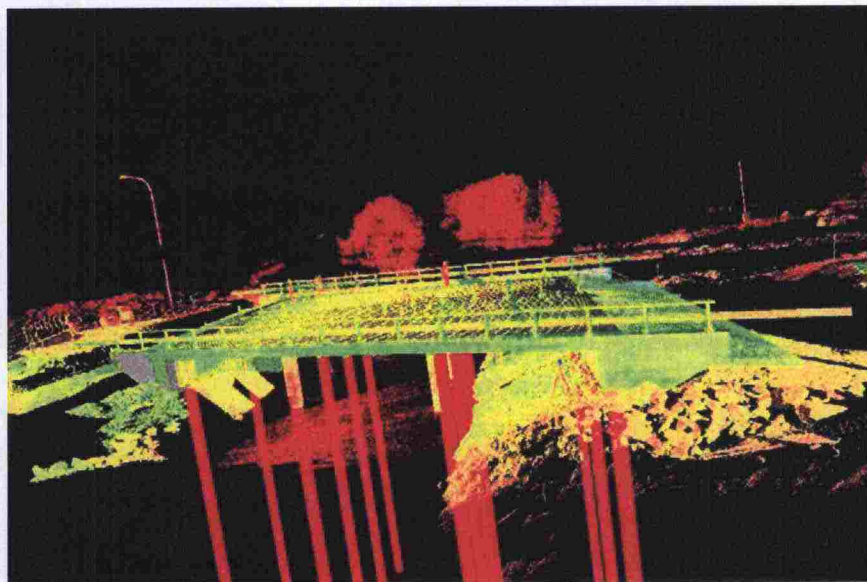
Jokaisessa tehdyssä keilauksessa mitattiin myös tähysten keskipisteet tarkasti. Kun keskipisteiden koordinaatit siltatyömaan koordinaatistossa tunnettiin samalla tehtyjen takymetrimittausten perusteella, voitiin kaikki pistepilvet muuntaa suoraan siltakoordinaatistoon. Tällöin kaikkia sillan 3D-sijainti-, mitta- ja muotopoikkeamia voitiin tarkastella suoraan siltasuunnitelmaan verrattuna. Siten jokaisessa mitatun pisteen poikkeamassa ”näky” mittapoikkeaman lisäksi myös sijaintipoikkeama. Voitaisiin myös käyttää termiä ”kokonaispoikkeama”. Jos haluttaisiin tarkastella pelkästään ulkomittoja ja muotoja, tulisi sijaintipoikkeamat ensin vähentää kokonaispoikkeamista.

Analyysin aluksi suunnitelmamalli luettiin aluksi AutoCADiin, josta se siirrettiin edelleen erityisellä COE-muuntimella Cyclone-ohjelmistoon. Tähän siirtoon meni aikaa noin 0,5 h. Oheisissa kuvissa suunnitelmamalli näkyy harmaana (laatta ja reunapalkit) ja punaisena (paalut). Mittauspilvessä havaitut virheelliset pistepilvet, esimerkiksi ihmiset, poistettiin analyysin aluksi aineistosta. Yhdessä tähyksessä havaittiin karkea virhe 8 m. Pistepilvi mallinnettiin erilaisilla matemaattisilla elementeillä. Mallinnustyö vei aikaa 2,5...3 h Paalukartioiden mallinnuksessa sovitettu säde tuli oikein. Kartion keskipiste siirtyi muutaman sentin ja se siirrettiin pilarin keskelle. Kauimmaisat saadut pistehavainnot olivat 155 m ja 185 m päästä (ilmeisesti tiepylväs). Lisäksi ilmeisesti yhden työkoneen aiheuttama heijaste saatiin 546 m päästä.



Kuva 39. S44-sillan mitattu 3D-pistepilvi ja suunniteltu solidimalli eri perspektiivistä.

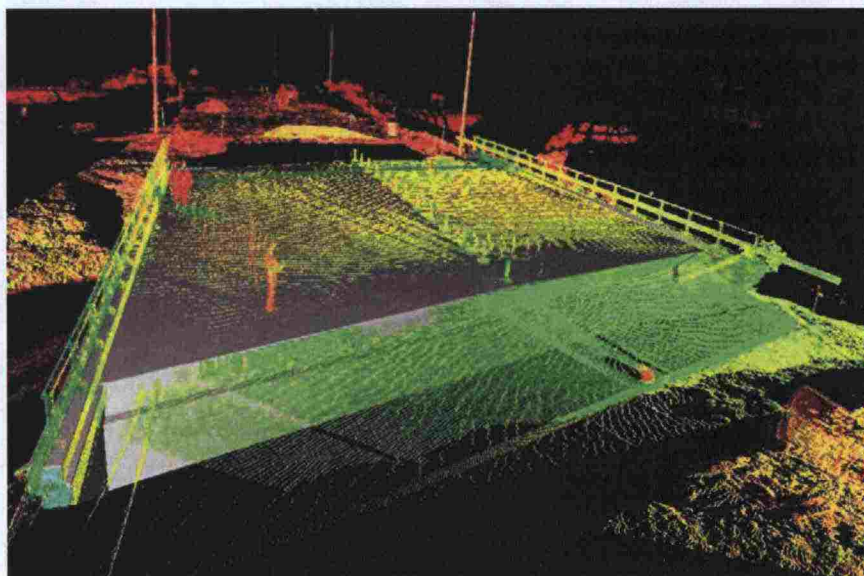
Sillan päissä oleva maakiila oli epätasainen. Molemmat maakiilat puuttuivat suunnitelmamallista. Yksittäisten pisteiden kokonaispoikkeamia suunnitelmamalliin nähden voitiin tarkastella Virtual Surveyor -toiminnolla. Kannesta poimittujen pisteiden pystysuuntaiset kokonaispoikkeamat olivat pääsääntöisesti alle 1 cm. Yhdessä kannen kohdassa havaittiin kuitenkin 27 mm poikkeama (kannen pohjoisnurkka, autopaikan vieressä). Suurin havaittu mahdollisesti yksittäisen kiven aiheuttama poikkeama oli 33 mm. Reunapalkin yläpinnan sivusuuntaiset mittapoikkeamat olivat maksimissaan 2,0...2,6 cm. Reunapalkin poikkeamien vertailu oli mallin avoimuudesta johtuen Cyclone-ohjelmalla ongelmallista.



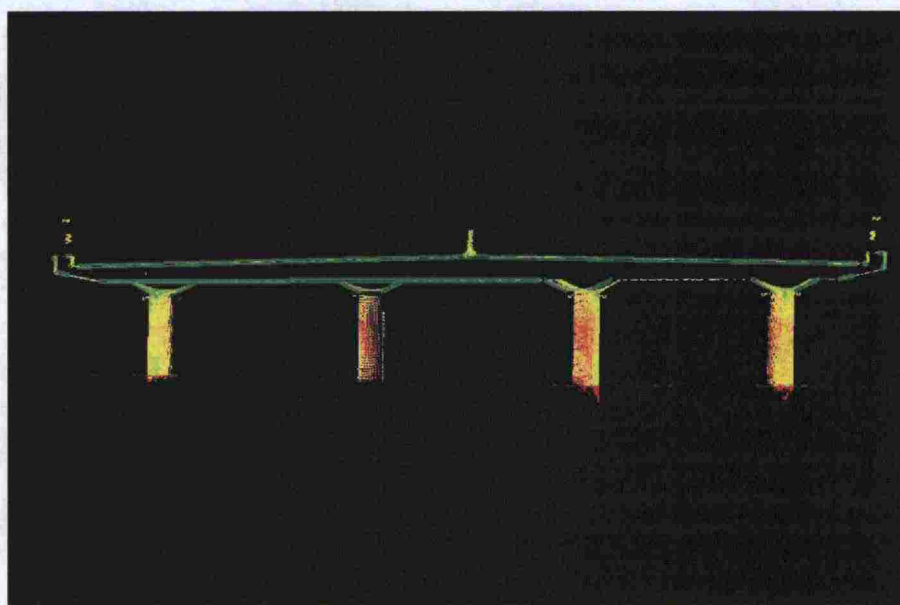
Kuva 40. S44-sillan mitattu 3D-pistepilvi ja suunniteltu solidimalli eri perspektiivistä sillan sivulta.

Kannen alapinnasta mitatut pystysuuntaiset kokonaispoikkeamat olivat alle 5 mm eli todella pieniä. Paalujen yläpään keskipisteiden kokonaispoikkeamat vaihtelivat 15...35 cm. Aiemmin takymetrillä suoritettut tarkemittaukset antoivat kannen poikkeamien vaihteluväliksi -32 mm...+10 mm keskiarvon ollessa -9 mm. Cyclon-

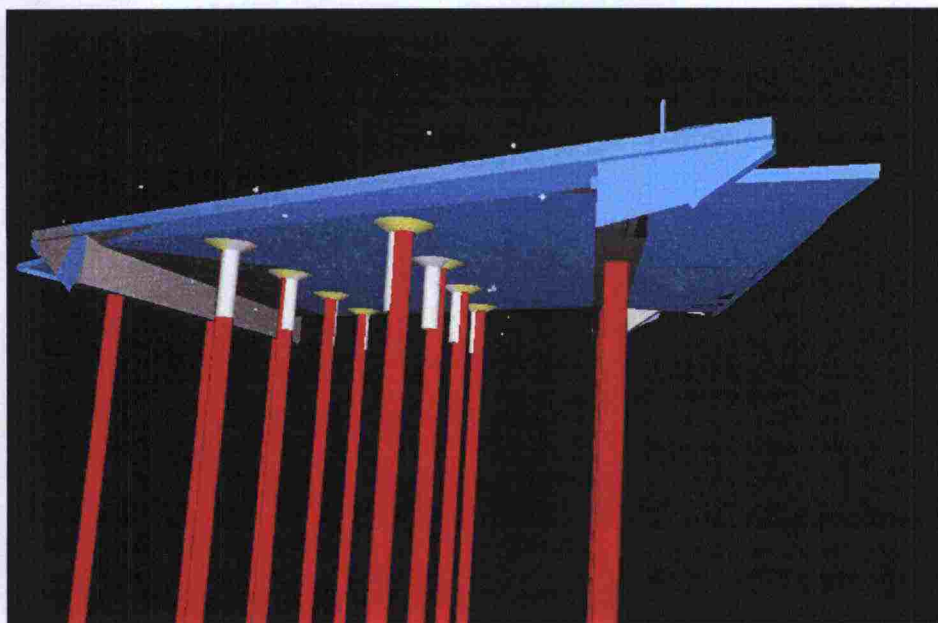
ohjelmistolla pistepilvestä voitiin poimia lähes vastaavansuuruinen vaihteluväli -38 mm...+14 mm keskiarvon ollessa sama -9 mm. Reunapalkin muotopoikkeaman vaihteluväli oli takymetritulosten mukaan -6 mm...+14 mm, missä keskiarvo oli -4 mm.



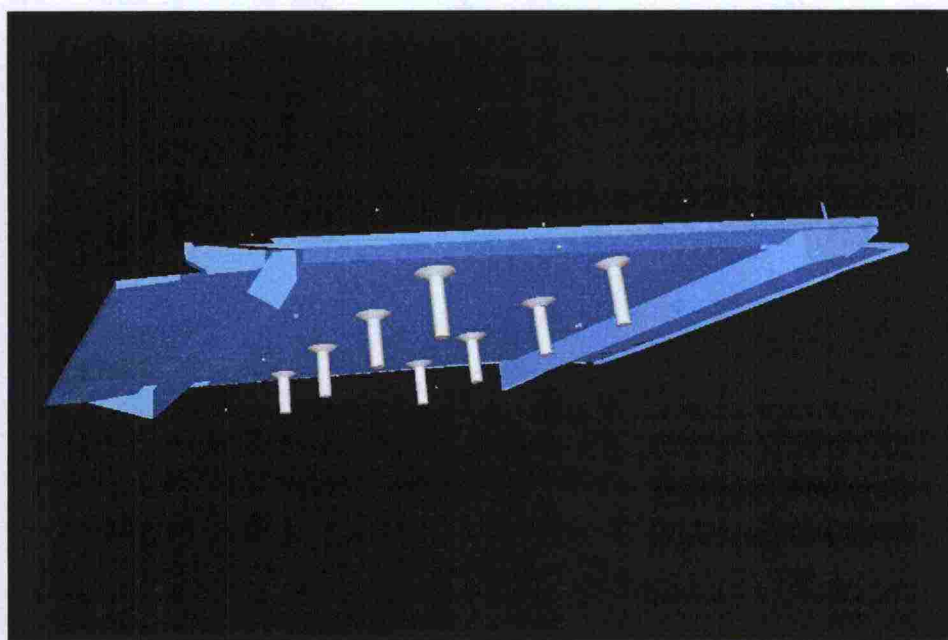
Kuva 41. S44-sillan mitattu 3D-pistepilvi ja suunniteltu solidimalli lintuperspektiivistä. Kuvassa näkyy myös paikalleen hetkeksi seisahtunut tutkija.



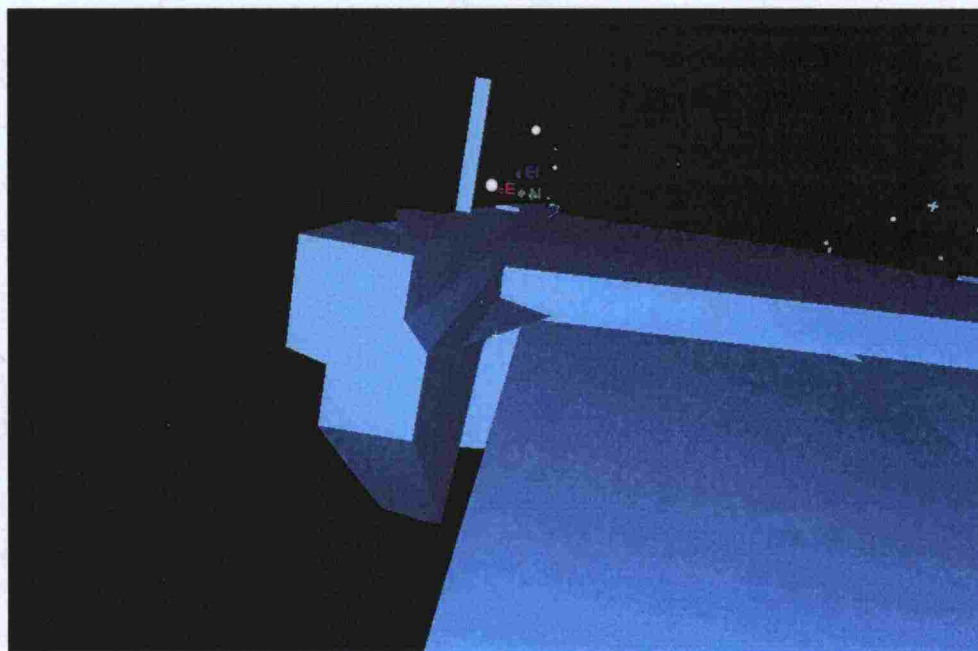
Kuva 42. Mitatusta pistepilvestä Cyclone-ohjelmistolla poimittu poikkileikkaus.



Kuva 43. Ns. globaalia tarkkuustarkastelua: S44 – mitattuun pistepilveen mallinnettu silta (sininen ja vaalean harmaa) sekä suunnitelmamalli (tumman harmaa ja punainen). Pistepilvi poistettu tästä kuvasta.



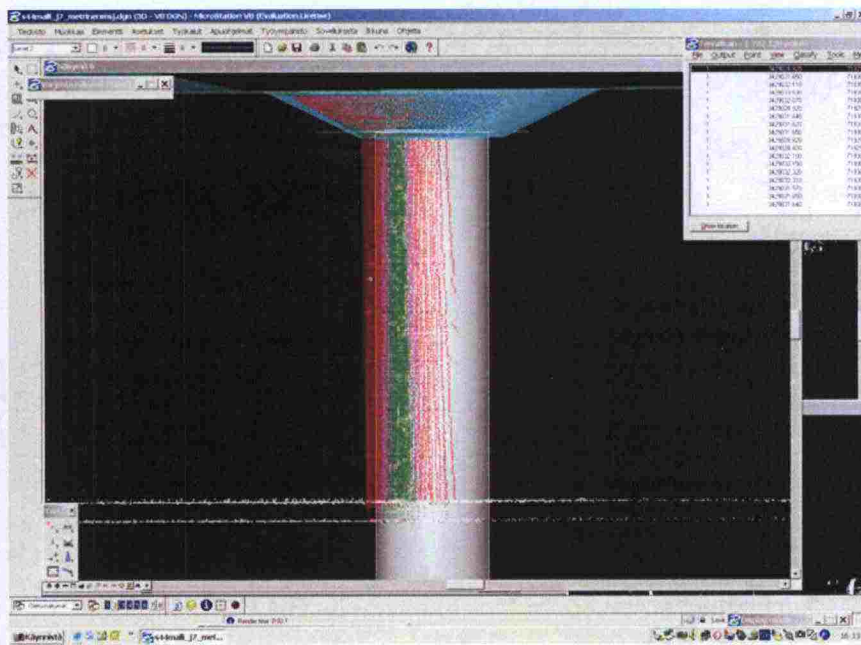
Kuva 44. Ns. globaalia tarkkuustarkastelua: S44 – mitattuun pistepilveen mallinnettu silta (sininen ja vaalean harmaa). Suunnitelmamalli ja pistepilvi poistettu tästä kuvasta.



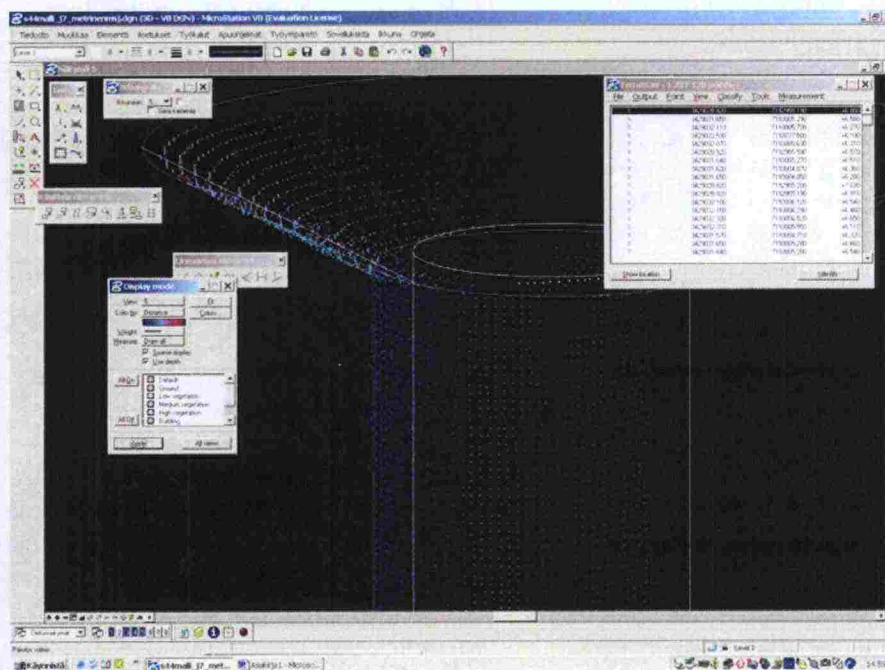
Kuva 45. Ns. globaalia tarkkuustarkastelua: S44 – pistepilvestä mallinnettu reunapalkki. Pistepilvi ja suunnitelmamalli poistettu.

Poikkeamien tarkastelu rajoittui Cyclone-ohjelmistolla yksittäisten pisteiden tarkasteluun kerrallaan. Kokonaisvaltaista esimerkiksi väreihin sidottua poikkeamatarkastelua ei voitu tehdä. Cyclone-mallinnus mittausteknisesti tarkasteltuna antaa kuvaa ns. globaalista sijainti- ja muotopoikkeamista (esimerkiksi tason sijaintipoikkeama tai ympyrän säteen poikkeama). Sen lisäksi olisi voitava tarkasteltava myös ns. lokaaleja poikkeamia eli globaalien muodon sisälle jääviä vaihteluja. Globaalit ja lokaalit poikkeamat yhdessä antavat tarkkuudesta paremman kuvan.

Terrasolid Oy kehitti projektissa 3D-mittaustulosten käsittelyyn uusia työkaluja. Alla olevat kuvat havainnollistavat ensimmäisiä testaustuloksia. Sovellukset on testattu MicroStation-V8 versiossa 8.10. Oleellista uutta näissä työkaluissa oli, että havainnoksi saatua pistepilveä pystyttiin nyt suoraan vertaamaan 3D-suunnitelmamalliin. Mallit luetaan samaan työtiedostoon päällekkäin, jolloin kolmiulotteisia eroja voidaan tarkastella sillan joka puolelta. Pistepilvestä ja suunnitelmamallista pystytään myös ottamaan havainnollisia poikkileikkauksia halutuista kohdista. Mittauksen suorittamistavasta johtuen laskettuihin poikkeamiin sisältyy mitta- ja muotopoikkeamien lisäksi myös sillan sijaintipoikkeamia. Jatkossa tehtäväksi jää siten erityyppisten poikkeamien erittely sekä SYL-toleransseihin vertauksen kytkemisen työkaluihin mukaan.



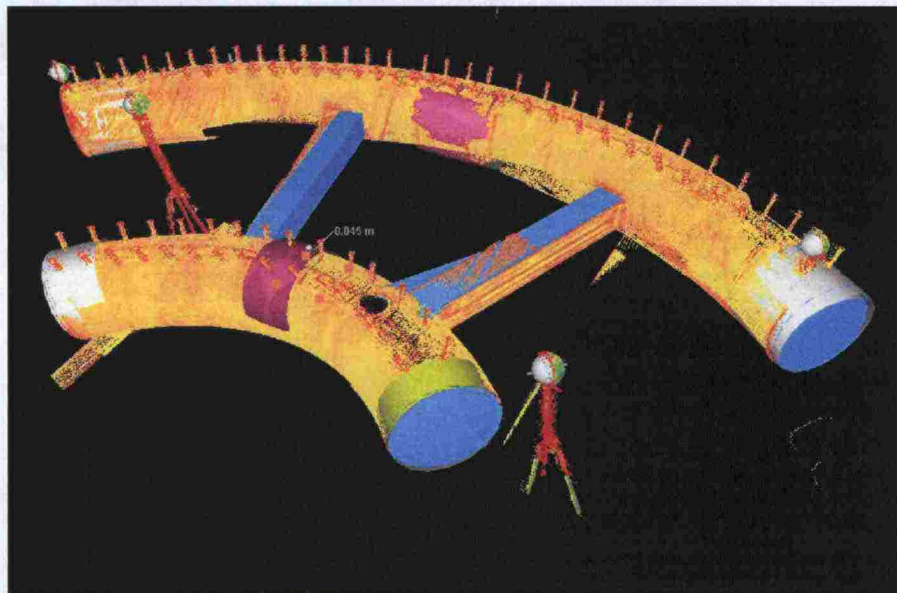
Kuva 46. Esimerkki pistepilven vertailusta solidimalliin. Suunnitelmamalli on tehty parasolidisella ytimellä. Leikkaus voi ottaa mistä vain – pistepilvi värjäytyy suoraan pintamalliin verrattuna. Sovellus voisi toimia myös reaaliaikaisesti: takymetrimittaus näyttäisi heti poikkeaman.



Kuva 47. Pistepilven vertailu sillan pilarielementtiin. Yksittäisen pisteen väri ilmoittaa kuinka kaukana piste on suunnittelulementin pinnasta.

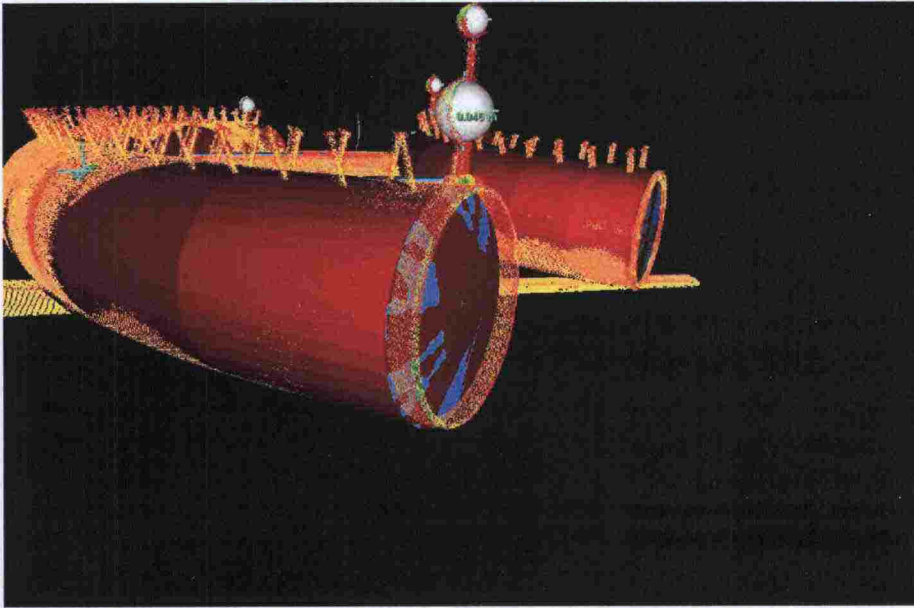
3.3 Terässiltalohkon laserkeilaustulokset

Teräslohkun laserkeilauksen analysoinnin tavoitteena oli mitatun spiraalilohkon kolmiulotteisten poikkeamien määrittäminen. Silta oli suunniteltu Xsteel-ohjelmalla 3D:ssä. Xsteel-ohjelmalla voidaan tuottaa siirtotiedosto kolmioverkko- tai linemallimuodossa, joka taas voidaan siirtää edelleen DXF-formaatilla AutoCADIin. AutoCADissa DXF-mallitiedosto muunnettiin edelleen COE-formaattiin, jota varsinaiseen analysointiin käytetty Cyclone-ohjelmisto luki sisään.

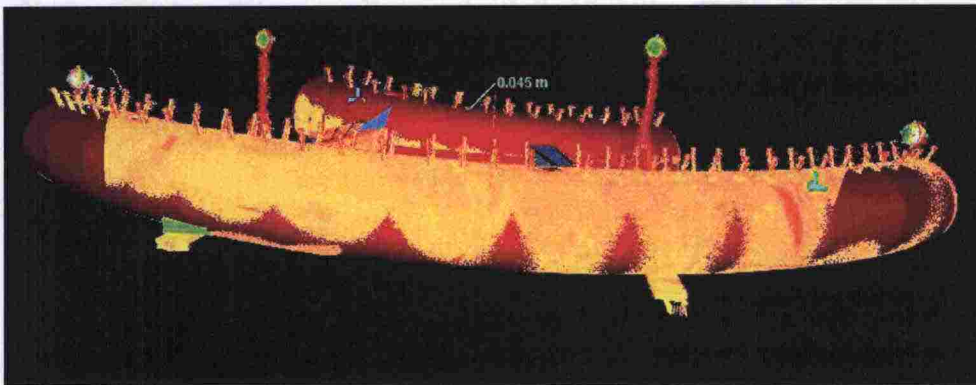


Kuva 48. Riikan terässillan LL4-spiraalilohkon laserkeilaustuloksia. Kuvassa keltaisena näkyy lohkosta mitattu pistepilvi, syaanina ja vaalean harmaana suunnitelmamalliin mallinnettuja sylinterinkappaleita sekä sinisenä suorakaidepalkkeja.

Mitatussa spiraalilohkossa ei ollut tarkkoja kiinnepisteitä, joihin perustuen tarvittava 6-parametrinen koordinaatistomuunnos suunnitelmakoordinaatistoon olisi voitu suorittaa. Muunnosta varten ympyräputkien päihin mallinnettiin 4 sylinterin pätkää (501, 502, 503, 504) sekä liitospalkkien tasopinnat (601, 602, 603, 604) ja (701, 702, 703, 704). Jokaiselle liitospinnalle oli ohjelmassa annettava oma tunnus. Koordinaatistomuunnosta testattiin useilla eri tavoin. Pelkästään liitospalkkien pinnoilla muunnos ei onnistunut riittävällä tarkkuudella. Muunnokseen jäi tällöin isoja virheitä (27,7 cm, 12,7 cm).



Kuva 49. LL4-mittaustuloksia havainnollistava sivukuva. Kuvassa punaisena näkyy taivutetun sylinterin suunnitelmamalli sekä keltaisena mittauspistepilvi. Tehdyn koordinaatistomuunnoksen mukaan sylinterin pää menee mittauspistepilven mukaan suunnitelmamallia pidemmälle. Samoin kauttaaltaan punainen alue merkitsee sitä, että pistepilvi ”menee sylinterin sisään” (18 mm yhden mittauksen mukaan).



Kuva 50. LL4-mittaustuloksia havainnollistava kuva ”edestä”. Kuvassa punaisena näkyy taivutetun sylinterin suunnitelmamalli sekä keltaisena mittauspistepilvi. Lähempänä olevan sylinterin keskialueella väliin punaisena, väliin keltaisena näkyvät alueet kertovat, että mittaustulokset noudattavat pääpiirteittäin suunnitelmamallin muotoa. Sylinteriputken päät taipuvat malliin nähden enemmän. Kauempana oleva sylinteri on pääpiirteittäin hieman suunnitelmaa ”kauempana” aivan vasenta reunaa lukuun ottamatta. Kuvassa näkyy myös Virtual Surveyor –toiminnolla sylinterin päältä laskettu poikkeama eli yksittäinen mittauspiste on kuvan mukaisessa koordinaatistossa noin 45 mm suunnitelmaa alempana.

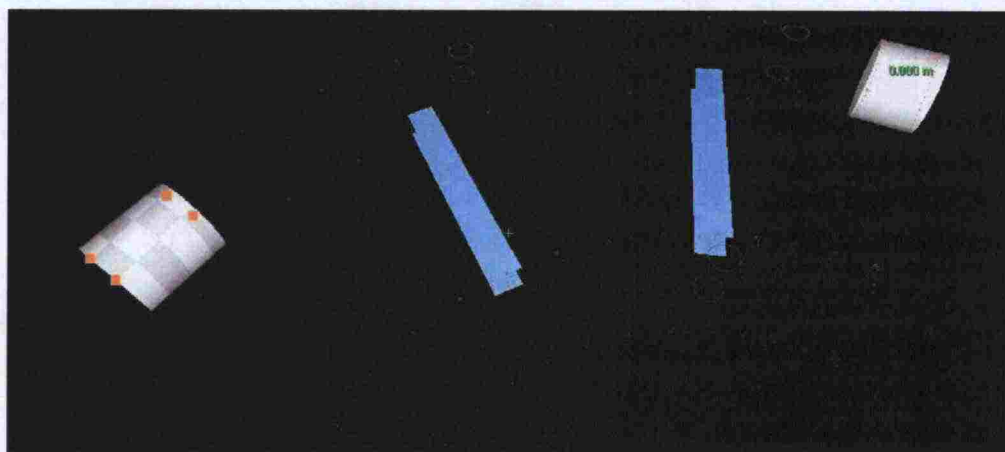
Myös viisteisiin osuneet pisteet oli poistettava liitosputkista tasojen sovituksissa. Toisessa palkissa yhden keilauksen tuottama pistepilvi ei sopinut toisten keilausten kanssa yhteen. Muunnoksiin kulloinkin käytetyt elementit valittiin ja siirrettiin ohjelman Control space -aputyökaluun (kuva 4). Osassa pistepilvissä ei näkynyt riittävästi tähyksiä, jolloin jouduttiin käyttämään lisänä mallinnettuja sylinteripintoja (301, 302). Suunnitelmamallissa taivutetut putket koostuivat kumpikin 12 suorasta putken osasta (sylinteripätkästä). LINE-mallissa poimittavissa olivat sylinteripätkien reunakäyrät (ympyrät). Cyclone-ohjelmistolla pystyi poimimaan reunaympyrät

ja sovittamaan kerrallaan valitun kahden ympyrän mukaan sylinteripinnan. Cyclonella pystyy mallintamaan pintoja eli tasoja, sylintereitä ja palloja. Pintojen leikkauskäyriä voi myös poimia mallinnuksen jälkeen. Koordinaatistojen yhdistämiseen voi käyttää tähysten lisäksi tasoja, sylintereitä ja palloja. Kolmioverkkomallia ei voitu hyödyntää Cyclonessa ollenkaan. Suunnitelmamalli mallinnettiin siten uudelleen Cylconessa.

Sylintereiden päissä ongelmia aiheutti sylinteriputkien sisä- ja ulkopuolisten pisteet. Muunnokset ja poikkeamat pyrittiin laskemaan ulkopinnan pisteistä. Näiden erottaminen toisistaan vaati analysointityötä. Myös suunnitelmamallia jouduttiin analyysissa muokkaamaan. Line-malliin lisättiin Cyclone-ohjelmistolla spiraaliosiin sylinterinpätkiä ja liitospalkkeihin tasot kaikille neljälle sivulle. Koska malli koostui suorista sylinteripätkistä jatkuvan kaarevan sylinterin sijaan, toi poikkeamien laskenta lisävirhettä sylinteripätkän tarkastelukohdasta riippuen.

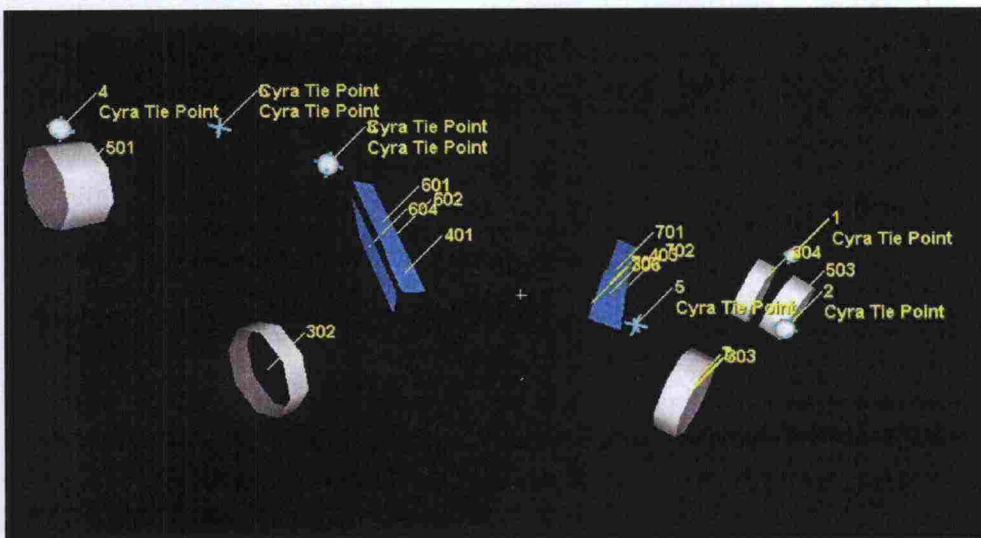
Kaikkiaan lohkon pinnoilta oli mitattu noin 1,7 miljoonaa pistettä. Suorakaiteen muotoisissa liitospalkeissa selviä sijaintipoikkeamia, jotka toivat koordinaatistomuunnokseen lisää epätarkkuutta. Ilmeisesti liitospalkkien sijainti ei niin oleellinen. Suorakaidepalkkien välinen kulma oli suunnitelmamallissa 37,545 goonia. Mittauspistepilveen sovitettujen tasojen välinen kulma oli 41 goonia. Tarkimmin onnistuneen koordinaatistomuunnoksen mukaan lyhemmän taivutetun putken puolelta katsottuna lyhemmän putken vasen pää ulottui 32 mm pidemmälle. Oikea pää jäi 22 mm vajaaksi. Pidemmän (taaemman) putken vasen pää oli 71 mm mallin päätä vasemmalla ja oikea pää 55 mm mallin päätä vasemmalla.

Oikean liitospalkin sisemmän tason ero suunnitelmamalliin oli 12 mm. Vasemman liitospalkin sisemmän tason ero suunnitelmamalliin oli 110 mm. Lyhemmän sylinteriputken vasen pää oli 20 mm mallin päätä alempana ja oikea pää 45 mm mallin päätä alempana. Pidemmän taivutetun putken puolelta katsottuna lyhemmän putken vasen pää 15 mm mallin päätä ylempänä ja oikea pää 10 mm mallin päätä alempana. Lyhemmän putken keskikohdassa yläpinnalta poimittu piste oli 16 mm mallia alempana (putken sisällä). Pidemmän putken keskeltä mitattu piste oli 12 mm mallia ylempänä (ulkopuolella), vertailu keskeltä suunnitelmamalliin mallinnettua sylinteripintaa). Kun mittaus toistettiin mallinnetun sylinteriputken reunalta, poikkeama oli enää 1 mm.

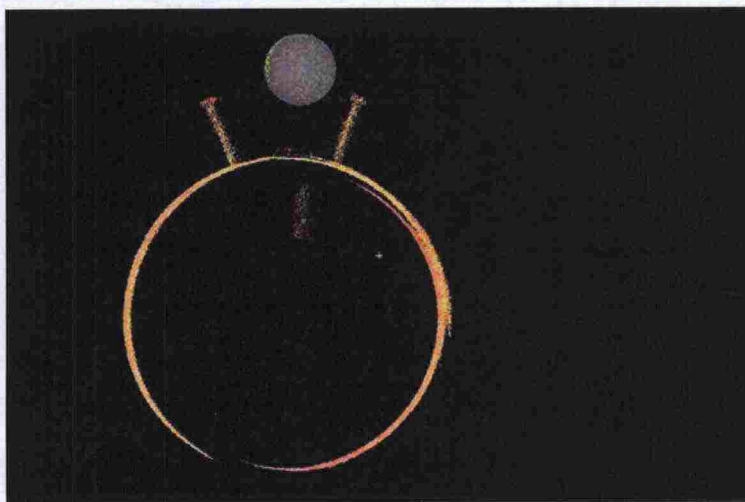


Kuva 51. Suunnitelmamalliin koordinaatistomuunnosta varten mallinnettuja geometrisia elementtejä: tasoja (liitospalkkien tahkot) ja sylintereitä (taivutetun sylinterin päitä). Taivutettujen sylintereiden suunnitelmamalli koostui yhteensä 24 sylinterin pätkästä. Kuvassa erottuvat (juuri ja juuri) sylinteripätkien reunakäyrät.

Geometrialtaan hyvin kolmiulotteisen vapaasti avaruudessa olevan kappaleen koordinaatiston määrittäminen voi kokeen perusteella olla työlästä. Tehtyyn koordinaatistomuunnokseen jäi silti epätarkkuutta, joka vaikuttaa myös poikkeamien suuruuteen aiheuttaen mitattujen poikkeamien tulkintatarvetta. Teoreettisesti tarkasteltuna koordinaatiston kiinnittämisessä on ratkaistava, mitä kappaleen pintoja halutaan pitää tarkkuudeltaan määräävinä (kriittisinä), ts. mitä mittaustuloksista käytetään muunnoksen tekemiseen. Mittaustilanteessa spiraalin taivutettujen sylinterien päihin olisi voinut asentaa tasomaisia ”tulppalevyjä”, jolloin päiden leikkaustasot olisi voitu mitata tarkasti. Samoin tulppalevyn keskipiste olisi voitu mitata tarkasti ja näin hyödyntää koordinaatistomuunnoksessa. Jos lohossa olisi ollut 3-4 tarkkaa kiinnittymispistettä, joiden koordinaatit olisi voitu mitata tarkasti takymetrillä, olisi muunnos ollut helposti tehtävissä ja tarkka (vrt. HAKI/S44-sillan mittauskoe). Tällaisen esimerkkikappaleen kolmiulotteisen valmistustarkkuuden kokonaisvaltainen analysointi on sangen vaativa ja vaikea tehtävä. Myös havainnollistamiseen kohdistuvat vaatimukset ovat suuret.



Kuva 52. Muunnoksessa käytetyt geometriset elementit (havaitut tähykset, sovitetut sylinterielementit ja tasot) mittauspistepilven ja suunnitelmamallin yhdistämiseksi samaan koordinaatistoon.



Kuva 53. Mittauspilvestä leikattu poikkileikkaus yhden sylinterin päästä. Tulosten analysointia vaikeutti se, että mittauspisteitä oli sekä sylinterin sisä- että ulkopinnoilta.

Prosessin helpottamiseksi mitattavassa kohteessa tulisi olla valmiina pisteet, joista voidaan määrittää mittaamalla kohteen koordinaatisto. Ennen mittausta on tarkistettava, että kohde on koordinaatiston mukaisessa asennossa eli kohde ei ole esimerkiksi vääntynyt. Jos koordinaatiston määrittelyssä käytetään suunnittelumallia, pitäisi olla tiedossa kohteen elementit, jotka ovat kriittisiä ja joita voidaan suurella luotettavuudella käyttää mallintamisessa. Mallinnettuja kohteita voitaisiin silloin käyttää koordinaatiston määrittämisessä.

Suunnittelijalta saatu malli ei ollut Cyclone-ohjelmaan sopiva. Kolmioverkkomalli ja tasomaisista "siivuista" koottu malli eivät vastaa toteutunutta kohdetta. Suunnittelumallissa kohde tulisi esittää matemaattisilla olioilla (sylinterit, pallot, tasot). Myöskään sylinteriä ei tulisi määrittää tasoina. Koordinaatiston luominen kyseisestä kohteesta vei noin 15 minuuttia, mutta kun kun se ei sopinutkaan heti tarkasti suunnittelumalliin, meni työaikaa runsaasti enemmän.

3.6 Havaintoja ratasiltatyömailta

3.61 Hausjärven ratasillan lyöntipaalutus

Ratasillan lyöntipaalutusta havainnoitiin 26.4.2003 Hausjärvellä, Oitissa. Toisen raiteen liikennekatkon pituus perjantaista maanantaihin. Toinen raide oli koko ajan liikennekäytössä. Junaliikenne oli erittäin vilkasta: työmaan ohitti juna noin 20-30 minuutin välein. Täysitoiminen turvamies päivysti jatkuvasti liikennettä ja varoitti lähestyvistä junasta. Kaikki työt keskeytettiin junan ohiajon ajaksi. Urakoitsijana oli H&P Maarakennus Oy.

Mittalaitteena työmaalla käytössä oli Trimblen perinteinen takymetri. Mittausryhmässä koostui kahdesta miehestä. Mittausryhmä oli työmaalla koko ajan paikalla. Mittaustehtäviä sinänsä oli vähän. Mahdollisuuksia muihinkin mittauksiin oli ajan puolesta runsaasti. Mittausryhmä oli mitannut ja merkinnyt teräspaalujen paikat raiteen kylkeen. Teräsbetonipaaluja lyötiin pienemmällä lyöntipaalutuskoneella. Halkaisijaltaan 77 cm teräspaalut lyötiin isommalla lyöntipaalutuskoneella. Teräsbetonipaalujen lyönnissä tarvittiin kaksi miestä; paalutuskoneen kuljettaja ja apumies, joka kiinnitti nostovaijerin paaluun sekä toimi paalun asennon silmämääräisenä tarkistajana ja loppulyöntisarjojen painuman mittaajana. Paalun painuminen loppulyöntisarjojen aikana mitattiin puukepin avulla. Mittakeppi tuettiin maahan ja kynällä piirrettiin viiva paalun kylkeen joka kymmenes lyönti. Viivojen väli kertoi painuman. TB-paalujen loppulyöntisarjojen (3 sarjaa, a' 10 lyöntiä) maksimipainumaksi oli määritetty enintään 3 cm/sarja, jolloin kantavuus katsottiin riittäväksi.

Pohjatutkimuksen mukaan kalliopinnan olisi pitänyt olla noin 23 m syvyydessä raiteiden tasosta. Yksi teräspaalu lyötiin kuitenkin 34 m syvyyteen eikä kalliota löytynyt vielääkään. Tämä aiheutti työmaalle ongelman: teräspaalut loppuivat kesken. Uusien paalujen toimitusaika oli vähintään yksi kuukausi. TB-paalut lyötiin kuitenkin vain puoleen suunnitellusta lyöntisyvyydestä, millä jo riittävä kitkakantavuus jo saavutettiin. Teräspaalun kantavuus mitattiin PDA-menetelmällä poraamalla ja kiinnittämällä paalun päähän neljälle puolelle venymä- ja kiihtyvyyssanturit. Tietokoneyksikkö oli pakettiautossa, josta koelyönnin generoimat anturisuureet ja johdannaisuureet nähtiin graafisesta reaaliajassa. Mittaukset suoritti Tampereen teknillinen yliopisto.

Tarkasteltu teräspaalu lyötiin 34 m syvyydelle. Riittävää kantavuutta paalulle ei mittauksen mukaan tällöinkään saavutettu. Lyönneillä paalu eteni syvemmälle hyvin vähän kerralla ja samalla joustaan, ts. paalu nousi heti takaisin lyönnin jälkeen. Paalun lyöntiä päätettiin jatkaa täyttämällä paalu ensin vedellä painon lisäämiseksi. Paalujen etenemiä olisi periaatteessa voitu robottitakymetrillä mitata koko ajan reaaliajassa asentamalla paalun kylkeen esimerkiksi heijastintarra l. tähys. Työtehtävät eri työntekijöiden välillä vaikuttivat ehkä kuitenkin jotenkin perinteisiltä: paalutuskoneen kuljettaja ei osallistunut anturoointeihin tai kantavuuksien määrittelyyn, joka tehtävä oli rajattu insinööreille – tarvitaanko insinööri tosiaan välttämättä työmaalla – piilekö tässä automatisointipotentiaalia? Mittausryhmä puolestaan ei osallistunut paalujen etenemän mittauksiin – siihen olisi ainakin aika varmaan riittänyt.



Kuva 54. Rautatien alikulkusillan rakentamistyöt lyöntipaalutusvaiheessa, Hausjärvi, Oitti, 26.4.2003. Ratasiltatyömaan pää työkoneina olivat neljä kaivinkonetta, kaksi Junttanin lyöntipaalutuskonetta ja pyöräkuormaaja.



Kuva 55. Teräspaalin jatkeen hitsaustyöt käynnissä. Paalin halkaisija 77 cm. Teräspaalin kylkeen kiinnitettiin neljä venymä- ja kiihtyvyyssanturia, joiden avulla saavutettu kantavuus arvioitiin.



Kuva 56. Teräsbetonipaalujen lyönti käynnissä.

3.62 Kuukson ratasillan tunkkaus

Ratasillan tunkkausta koskeva työmaahavainnointi suoritettiin Iitissä, Kausalassa, Kuukson siltatyömaalla 16.8.2003. Myös tällä siltatyömaalla toinen rata jatkuvassa liikennekäytössä. Junien nopeus työmaan kohdalla oli 80 km/h. Rataliikennekatko alkoi lauantaina kello 9:45 ja päättyi sunnuntaina kello 9 (työmaa myöhästyi lopulta tästä tästä tavoitteesta 40 minuuttia). Valetun sillan tarkemmittauksessa havaittiin sillan reunapalkin muotin taipuneen valuvaiheessa ulospäin 3-5 cm. Suunnitelmissa esitetyn 40 mm sauman sijaan sillat menivät ”limikkäin”. Siltaa jouduttiin työmaalla piikkaamaan. Mittauskonsulttina työmaalla oli Etelä-Suomen Mittauspalvelu Oy (Pekka Kaksonen). Kaksosen mukaan 3D-suunnitteluun siirtyminen on hieno juttu myös mittauksien kannalta. Nykyisin he saavat suunnittelijoilta piirustukset, joista joutuvat itse tekemään 3D-mallinnuksen. Kaksonen tekee itse mittausuunnittelun spatiaalisesti MicroStationilla. Siltojen toleranssiohjeistot kaipaavat Kaksosen mukaan uudistamista.

Oleellisia tärkeitä mittoja työmaalla on mm. paalujen päähän asennettavien laakereiden yläpinta. Silta on kuin 6-jalkainen pöytä, joka on mitoitettu niin, että jokainen jalka (paalu) kantaa omansa. Siltakansi on niin jäykkä, että poikkeavuudet kannen tukeutumispisteissä aiheuttavat ylimääräistä rasitusta siltakanteen (vertaa nelijalkainen pöytä, jossa yksi jalka on muita lyhyempi). Siksi sillan kannen alapinnan laakereiden vastakappaleiden korot on mitattu etukäteen, jotta laakerit osattaisiin asentaa oikeaan korkoon. Tarvittaessa korkoa sovitetaan ohuilla teräslevyillä. Tärkeätä ei ole niinkään asentaa laakereita tarkalleen samaan korkoon kuin suunnitelmissa, vaan niin, että laakereiden korkopoikkeamat suunnitelmissa esitetyistä on samat. Tässä kohteessa on välitukien laakereiden yläpinta oli tarkoituksellisesti 10 mm teoreettista korkoa alempana, jotta kuorma siirtyisi enemmän päätyuille. Oleellisesti tärkeintä oli, että aiemmin keväällä lyötyjen teräsputkipaalujen sijainti vastasi sillan kanteen valettuja vastakappaleita. Paalun ja kannen välinen liitos sallii noin ± 100 mm toleranssit paalujen sijainnissa suhteessa kannen vastakappaleisiin.



Kuva 57. Iitti, Kausala: Kuukson alikulkusiltatyömaan yleiskuva. Työmaalla mm. 3 kaivukonetta, yksi pyöräkuormaaja, raidenosturi ja maansiirtoautoja.



Kuva 58. Työmaa länteen päin kuvattuna. Vasemmalla raiteet vielä paikoillaan, oikealla valettu, kokonainen betonisilta siirtoa odottamassa. Lähimpänä siirtokiskojen betoniset siirtymälaattaelementit.



Kuva 59. Raiteet irrotettiin isoina elementteinä ja nostettiin raidenosturilla kokonaisina työkohteen itäpuolella perustettuun välivarastoon.



Kuva 60. Raiteiden poiston jälkeen aloitettiin välittömästi maankaivu ja -poisto tulevasta siltapaikasta. Työn aikana ponttiseinämä esti kaivuun vaikutukset viereiseen jatkuvassa käytössä olevaan rataan.



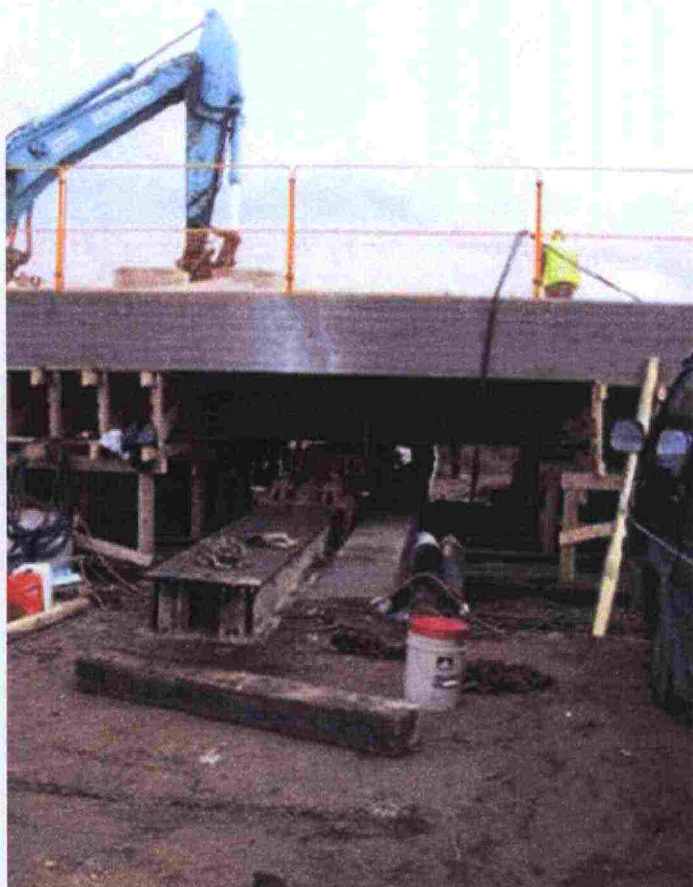
Kuva 61. Työmaa on tässä edennyt jo siirtoratakiskojen asennusvaiheeseen. Taaempi siirtolinja on tässä vaiheessa jo valmis.



Kuva 62. Siirtokisko valmiina. Betonisten anturidien alle asennettiin ja tiivistettiin kantavaa mursketta 70 cm.



Kuva 63. Tarvittavat tarkemittaukset suoritettiin Leica TRX-takymetrillä.



Kuva 64. Siirtokisko tunkkeineen siirrettävän sillan alla.

4 PÄÄTELMIÄ

Projektissa on tutkittu ja kehitetty teräsbetonisiltojen suunnittelun ja työmaan mittausten kolmiulotteista toimintaprosessia. Väliraportti dokumentoi ja kokoaa projektin aikana tehtyjä toimia ja kerättyä tietoa pyrkimättä vielä kuitenkaan lopullisiin syvempiin johtopäätöksiin. Yleisiä tuloksia ja päätelmiä kuitenkin jonkin verran jo esitetään.

Sillat kytkeytyvät laajemmin tarkasteltuna yhdeksi osaksi tieväylien suunnittelua ja rakentamista. Tässä kokonaisuudessa tietojen siirtämisessä ja jalostamisesta osavaiheesta toiseen vaikuttaa edelleen esiintyvän ongelmia, tietokatkoksia ja osaamattomuutta. Tarvittavia tiegeometriatietoja ei vielä yleisesti osata siirtää toimintaprosessin osavaiheesta toiseen. Siirtyminen uuteen 3D-toimintamalliin vaikuttaa ensimmäisten kokemusten perusteella olevan hyvin perusteltavissa. Hyötyjä arvioitiin saavutettavan jo pelkästään sillansuunnittelussa. Sillansuunnitteluun projektissa kehitettiin uusia pursotustyyppisiä mallinnustyökaluja teräsbetonisiltojen tyypillisten eri rakenneosien mallintamiseen. 3D-geometriamallin täydentynee tulevaisuudessa yhä enemmän tuotemallityypiseksi geometriatiedon lisäksi myös muuta tietoa sisältäväksi malliksi.

Oleellista on myös suora tiedonsiirtoyhteys työmaan mittaussuunnitteluun ja mittauksiin. Sillan 3D-mallista voidaan poimia paikalleenmittauksiin ja laaduntarkastusmittauksiin kulloinkin tarvittavaa geometriatietoa ilman erillistä koordinaattien laskentaa. Myös reaaliaikainen CAD/CAM-tyyppinen työskentely on mahdollista. Tällöin takymetrilla mitatut koordinaatit näkyvät CAD-mallissa välittömästi mittauksen jälkeen. CAD-mallista voidaan myös ohjata takymetrin mittaustoimintoja esimerkiksi pisteen paikalleenmittauksessa. Graafinen CAD-käyttöliittymä vaikuttaa myös hyvin soveltuvan mittausteknikkojen mittaussuunnittelutyökaluksi. Koulutusta hallittuun käyttöönnottoon ja virheettömyyden käyttämiseen kuitenkin varmasti tarvitaan.

Työmaalla nykyaikaisilla 3D-mittaustekniikoilla eli lähinnä robottitakymetrilla ja laserkeilaimella pystytään suoraan hyödyntämään suunnittelijan tekemään sillan 3D-geometriamallia. Tyypillisesti paikalleenmittaukset suoritetaan takymetrilla. Pistepilviä mittaavat laserkeilaimet vaikuttavat kokeiden perusteella soveltuvan muottien ja siltojen tarkastusmittauksiin erinomaisesti. Kehitetyillä uusilla työkaluilla voidaan suoraan ja havainnollisesti tarkastella muoteissa ja valmiissa silloissa olevia sijainti-, mitta- ja muotopoikkeamia kolmiulotteisesti. Poikkeamia voidaan havainnollistaa poikkeamien suuruuden mukaan värjäämällä. Jatkotutkimuksen ja -kehityksen tehtäväksi jää kolmiulotteiseen toimintamalliin paremmin sopivan toleranssijärjestelmän uudistaminen.

Älykäs silta –projektin voidaan arvioida saavuttaneen alkuperäisiä tavoitteita laajalla rintamalla. Tehty työ on johtanut selkeästi koko ajan laajentuviin näkemyksiin silta-alan suunnittelun ja mittausten kehittämisestä. Uusia työkaluja siltojen 3D-suunnitteluun on kehitetty ja osin jo testattu. Testaukset ja sovellusten viimeistely jatkuu projektin pilotointivaiheessa. Pilotoinnissa kerätään vielä kokemuksia neljän erityyppisen sillan 3D-suunnittelu- ja mittausprosessin läpiviennistä.

LÄHDELUETTELO

[CALLIDUS] Callidus precision systems, brochure, 2002, Callidus Presicison Systems GmbH.

[CYRA] CYRA-seminaariaineisto, 2003, Leica Nilomark Oy, Espoo, Seminar Material Folder.

[Foltz] Foltz, L. B., 2000, 3D Laser Scanner Provides Benefits for PennDOT Bridge and Rockface Surveys. Professional Surveyor, May 2000, 4 p.

[Gordon] Gordon, S. & Lichti, D. & Stewart, M., 2001, Application of a High-resolution, Ground-based Laser Scanner for Deformation Measurements. The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, 19-22 March 2001, Orange, California, USA, pp. 23-32.

Heikkilä, R. & Jaakkola, M. & Pulkkinen, M. (2003) Connecting 3-D Concrete Bridge Design to 3-D Site Measurements. ISARC'2003, 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 21-24 September 2003. Eindhoven, the Netherlands, pp. 259-264.

[Johansson] Johansson, M., 200?, Explorations into the Behaviour of three different high-Resolution Ground-based Laser Scanners in the Built Environment, pp. 33-38.

[Koski] Koski, J., 2003, Laserkeilaus – uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen. Maankäyttö 4/2001, s. 24-26.

[Koski] Koski, J., 2002, Laserkeilauksen perusteet ja Cyrax 2500 - laserkeilausjärjestelmä. Espoon-Vantaan teknillinen ammattikorkeakoulu, Maanmittaustekniikan koulutusohjelma, insinöörityö, 116 s.

[McManus] McManus S., 2002, Secrets of the past. Bd&e, First Quarter 2002, www.bridgeweb.com, 2 p.

[Santala & Joala] Santala, J. & Joala, V., 2003, On the Calibration of a Ground-based Laser Scanner. FIG'2003, Paris, April 13-17, 2003, 7 p.

SYL 1, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Yleiset Ohjeet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 22 s.

SYL 2, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Maa- ja pohjarakenteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 51 s. + liitteet.

SYL 3, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Betonirakenteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 80 s. + liitteet.

SYL 4, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Teräsrakenteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 75 s. + liitteet.

SYL 5, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Teräsrakenteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 13 s.

SYL 6, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Kannen pintarakenteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 38 s. + liitteet.

SYL 7, 1996. Sillanrakennuksen yleiset laatuvaatimukset. Varusteet ja laitteet. Helsinki, Tielaitos, Siltakeskus, Työselitykset ja laatuvaatimukset, 25 s. + liitteet.

[Wistbacka] Wistbacka, J., 2003, Vinoköysisillan ulokeasennusvaiheen analysoinnin erityispiirteet. Rakennustekniikka 5/2003, s. 64- 66.

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-303-x
TIEH 3200886